



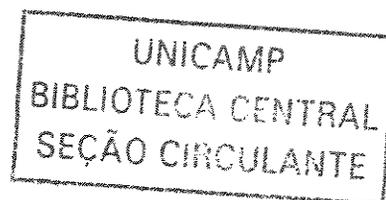
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS QUÍMICOS

**SIMULAÇÃO, PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA
UNIDADE PILOTO MULTI-PROPÓSITO PARA
PIRÓLISE DE RESÍDUOS**

AUTOR: Vinicyus Rodolfo Wiggers
ORIENTADORA: Profa. Dra. Maria Regina Wolf Maciel
CO-ORIENTADORES: Prof. Dr. Henry França Meier
Prof. Dr. Antonio André Chivanga Barros

Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia Química como
parte dos requisitos exigidos para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia Química.

Campinas, Março de 2003



UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

UNIDADE	Be
Nº CHAMADA	T/UNICAMP
	W639s
V	EX
TOMBO BCI	55141
PROC.	16-124103
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	07/08/03
Nº CPD	

BIBID 297393

CM00187274-3

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

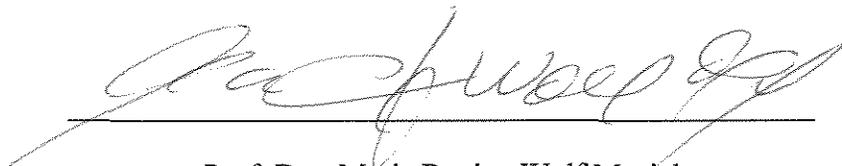
W639s Wiggers, Vinicyus Rodolfo
 Simulação, projeto e construção de uma unidade piloto
 multi-propósito para pirólise de resíduos / Vinicyus
 Rodolfo Wiggers.--Campinas, SP: [s.n.], 2003.

Orientadores: Maria Regina Wolf Maciel , Henry
 França Meier e Antonio André Chivanga Barros.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

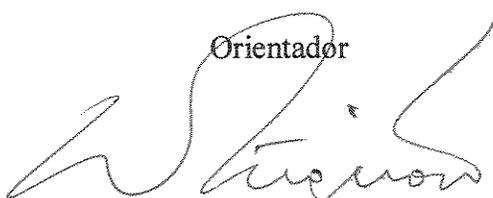
1. Pirólise. 2. Reatores fluidizados. 3. Resíduos. I.
 Maciel, Maria Regina Wolf. II. Meier, Henry França. III.
 Barros, Antonio André Chivanga. IV Universidade
 Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química.
 V. Título.

Dissertação de Mestrado defendida por Vinicyus Rodolfo Wiggers e aprovada em 31 de Março de 2003 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof. Dra. Maria Regina Wolf Maciel

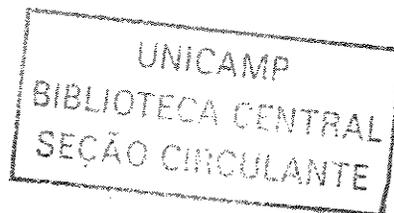
Orientador



Dr. Waldir Pedro Martignoni

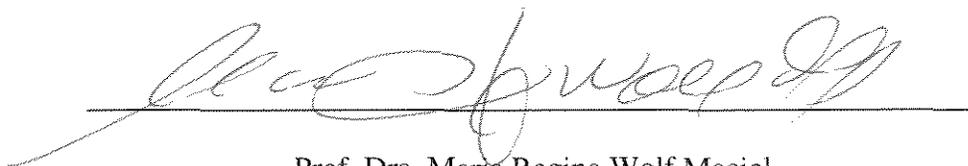


Prof. Dr. Edson Tomaz



978501052003

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química

A handwritten signature in black ink, written over a horizontal line. The signature is cursive and appears to read 'Prof. Dra. Maria Regina Wolf Maciel'.

Prof. Dra. Maria Regina Wolf Maciel

A Deus.

Aos meus pais pelo amor para comigo e apoio irrestrito para a realização desta.

Gostaria de agradecer de uma forma especial a minha mulher e companheira LÍlian que proporcionou a maior alegria de minha vida até o momento, o nascimento de nossa filha Letícia, pela compreensão e muitas horas que lhe foram roubadas.

A minha filha Letícia pela felicidade e alegria que me proporciona.

A minha orientadora Prof^ª. Maria Regina Wolf Maciel pela credibilidade, amizade e apoio fornecido. Agradeço também aos meus Co-orientadores Antônio André Chivanga Barros e a Henry França Meier pelos seus generosos ensinamentos, conselhos fornecidos e sincera amizade.

A Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP.

A FURB (Universidade Regional de Blumenau), que deu suporte logístico e financeiro para a execução deste projeto, ao Departamento de Engenharia Química desta instituição e todos os professores e funcionários que dela fazem parte, e ao Programa de Mestrado em Engenharia Ambiental.

Em especial aos professores Laércio, Atilano, Edelberto, José Alexandre e Pablo pela pronta atenção e opinião em assuntos diversos.

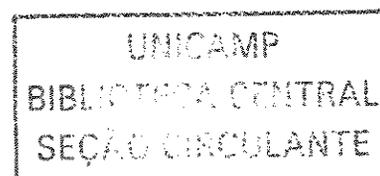
Ao FUNCITEC (Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado de Santa Catarina) que deu suporte financeiro a este projeto.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro na primeira fase do projeto.

A todos os colegas de mestrado em especial, a Farley, Rodrigo, Dirceu e Kasper, Elis e Karoline e aos amigos Rubens e Nórton.

A todos os integrantes do LOPCA, LFC e LDPS pelo convívio e amizade.

Aos integrantes do clube KARTOOZE pela amizade.



“Se a tecnologia hoje produz poluição, deve-se precisamente ao fato de ainda se encontrar num estágio primitivo de evolução. Novas descobertas e a aplicação das já efetuadas levarão ao controle progressivo das conseqüências maléficas da tecnologia atual”.

Paulo A. Grisa.

Resumo

A pirólise, uma das muitas alternativas de processos de conversão química de resíduos sólidos, tem recebido uma atenção especial de ambientalistas, engenheiros e da comunidade científica.

Este processo tem sido testado em um número incontável de plantas piloto, e muitos sistemas em escala industrial já são operados com sucesso.

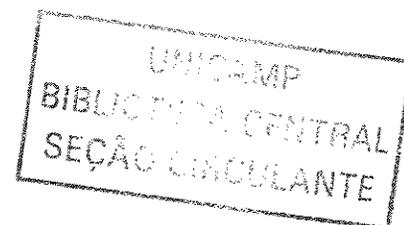
Sofrendo aquecimento em uma atmosfera livre de oxigênio, muitas substâncias orgânicas de cadeia longa, podem ser fracionadas via craqueamento térmico e reações de condensação, em frações gasosas, líquidas e sólidas de menor peso molecular com maior valor econômico.

Ao contrário da incineração que é altamente exotérmica, a pirólise é endotérmica, ocorre numa faixa de temperatura da ordem de 300 a 600°C e apresenta vantagens como a menor formação de dioxinas e a possibilidade de processo autotérmico.

Este trabalho tem o propósito de simular, projetar e construir uma planta piloto de pirólise em reator de leito móvel através de solução de modelos matemáticos e métodos numéricos. Além disso, pretende-se desenvolver uma estratégia do tipo problema inverso para ajuste numérico de parâmetros térmicos e cinéticos do processo.

Para tanto, projetou-se e montou-se um aparato experimental em escala piloto, com finalidade multi-propósito, para aquisição de dados do processo com e sem reação, mediante o desenvolvimento e uso do modelo microscópico unidimensional e permanente de conservação da massa e da energia.

Palavras Chave: Pirólise, Resíduos, Reator de Leito Móvel.



Abstract

Pyrolysis, one of many solid waste chemical conversion processes, has been receiving a special attention from engineers, researchers and environment specialists. The pyrolysis has been tested in many pilot plants, and some industrial plants are operated with success. Heating in a controlled atmosphere absenced of oxygen, an organic portion of waste materials can be converted into mixture gases, oils with lower molecular weight and others products with higher economic value. This transformation occurs through thermal cracking and condensation reaction.

Whereas incineration is exothermic, pyrolysis is endothermic and runs in range temperatures from 300 to 600°C. This process still presents some advantages like smaller dioxines formation than the incineration and also the possibility of autothermal operation of the process.

This work has the propose to simulate, project and build a pilot plant of pyrolysis with a fluidised bed reactor, by using mathematical modelling and numerical methods for simulation of the process. It also intends to develop strategies to solve an inverse problem to predict thermal and kinetics parameters of the model from experimental data obtaneid in a pilot plant and a methodology to determine a thermic and kinetic parameters of solid waste.

To get this objective, a microscopic model 1-D and steady state, of mass and energy conservation was developed, the simulation for design and the construction of an experimental aparatus in a pilot plant scale was realized, to get a process data with and without reaction, to intend a scale-up from process.

Key words: Pyrolysis, Wastes, Fluidised bed reactor.

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação pelo Tema	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Temática da Tese	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Considerações Gerais	4
2.2	Caracterização dos Resíduos	5
2.3	Aplicações	7
2.4	Termogravimetria	9
2.5	Estado da Arte	10
2.6	Aspectos para Investigação	12
3	MODELAGEM MATEMÁTICA E MÉTODOS NUMÉRICOS	13
3.1	Equações de Conservação	13
3.1.1	Modelo Cinético/Conservação da Massa	14
3.1.2	Modelo Térmico/Conservação da Energia	16
3.1.3	Equações Constitutivas	17
3.2	Propriedades Físicas	22
3.2.1	Massa Específica	23
3.2.2	Viscosidade Molecular	23
3.2.3	Condutividade Térmica	25
3.2.4	Capacidade Calorífica	26
3.3	Métodos Numéricos	29
3.3.1	Solução Numérica do Modelo	29
3.3.2	Método dos Mínimos Quadrados	29
3.3.3	Ajuste Numérico de Parâmetros	30
4	PROJETO E CONSTRUÇÃO DA UNIDADE PILOTO MULTI-PROPÓSITO	32
4.1	Fluxograma de Processo e Descrição da UPMP	32
4.2	Simulação para Projeto	34
4.3	Projeto da UPMP	42
4.4	Sistema de Aquisição de Dados e Procedimentos de Calibração	49
4.4.1	Sistema de Aquisição de Dados e Calibração	49

4.4.2	Sistema de Alimentação	50
4.4.3	Medidas de Vazão	51
4.4.4	Medidas de Temperatura	53
4.4.5	Medidas de Pressão	55
4.5	“Start-Up” da Unidade	56
5	Resultados e Análises	58
5.1	Experimentação Numérica	58
5.2	Avaliação Térmica da UPMP	59
5.3	Comparação de Modelos	63
5.4	Teste de Regressão	65
5.5	Partida da Unidade (“start-up”)	66
6	Conclusões e Sugestões	74
7	Referências Bibliográficas	76
8	Anexos	80

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema do módulo reacional k	15
Figura 2. Analogia térmica para a transferência de calor.	17
Figura 3. Fluxograma do processo da UPMP.....	33
Figura 4. Vista dos resultados da combustão de GLP utilizando o software CGComb 1.0. 34	
Figura 5. Vista das propriedades físicas da queima de GLP utilizando o software CGComb 1.0	35
Figura 6. Perfil de temperatura da UPMP com 80000 kcal/h, 1200°C e $d_p=4\text{mm}$	36
Figura 7. Perfil de temperatura da UPMP com 180000 kcal/h, 1200°C e $d_p=4\text{mm}$	37
Figura 8. Perfil de temperatura de UPMP com 80000 kcal/h, 900°C e $d_p=4\text{mm}$	38
Figura 9. Perfil de temperatura da UPMP com 180000 kcal/h, 900°C e $d_p=4\text{mm}$	39
Figura 10. Perfil de temperatura da UPMP com 80000kcal/h, 900°C e $d_p=2\text{mm}$	40
Figura 11. Perfil de temperatura da UPMP com 80000 kcal/h, 900°C e $d_p=1\text{mm}$	40
Figura 12. Projeto e vista dos módulos reacionais.	42
Figura 13. Vista do queimador.	43
Figura 14. Vista do esquema do sistema de alimentação de resíduo.....	44
Figura 15. Vista do sistema de alimentação do resíduo.	45
Figura 16. Projeto do ciclone.....	45
Figura 17. Vista do Ciclone.....	46
Figura 18. Vista do condensador.	46
Figura 19. Vista da Torre de resfriamento.....	47
Figura 20. Projeto dos tambores “flash”.....	48
Figura 21. Vista dos tambores “flash”.....	48
Figura 23. Vista frontal inferior da UPMP.....	50
Figura 24. Curva de Alimentação da Rosca Alimentadora.	50
Figura 25. Vista do Tubo de Pitot, manômetro e válvulas de controle de vazão.	52
Figura 26. Perfil de velocidade obtido experimentalmente.....	53
Figura 27. Vista dos Termopares e indicadores de temperatura.	54

Figura 29. Esquema de aquisição de dados.....	55
Figura 30. Vista dos Transmissores de Pressão.....	56
Figura 31. Vista do painel elétrico	57
Figura 33. Perfil de temperatura da UPMP com 80000 kcal/h, 900°C e $d_p=4\text{mm}$	60
Figura 34. Perfil de temperatura da UPMP com 130000 kcal/h, 900°C e $d_p=4\text{mm}$	61
Figura 35. Perfil de temperatura da UPMP com 180000 kcal/h, 900°C e $d_p=4\text{mm}$	62
Figura 36. Perfil de temperatura da UPMP com modelo macroscópico.	63
Figura 37. Perfil de temperatura da UPMP com modelo microscópico e propriedades físicas constantes.	64
Figura 38. Perfil de Temperatura da UPMP com modelo microscópico e propriedades físicas variáveis.....	65
Figura 39. Regressão numérica do Coeficiente Global de Transferência de Calor.....	66
Figura 40. Perfil de temperatura da UPMP com 130000 kcal/h após 4 horas ligado.....	67
Figura 41. Perfil de temperatura da UPMP com 130000 kcal/h após 4:35h ligado.	68
Figura 43. Perfil de temperatura da UPMP com 130000 kcal/h após 6:10h ligado.	70
Figura 44. Perfil de temperatura da UPMP com 130000 kcal/h após adição de N_2	71
Figura 45. Perfil de Temperatura da UPMP com 130000 kcal/h 25min. após adição de N_2	72
Figura 44. Vista frontal da UPMP.....	73

Lista de Tabelas

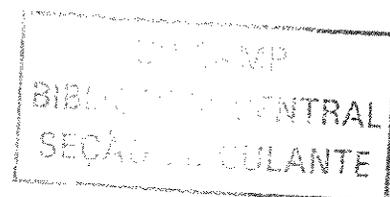
Tabela 1. Composição básica, propriedades e parâmetros do gás de combustão.....	28
Tabela 2. Composição básica, propriedades e parâmetros da mistura reacional.....	29
Tabela 3. Propriedades físicas do poliestireno.....	37
Tabela 4. Principais condições simuladas.....	42
Tabela 5. Principais resultados simulados.....	42
Tabela 6. Dados de Velocidade.....	54
Tabela 7. Resultados obtidos com temperatura de entrada a 900 e $dp=2\text{mm}$	60
Tabela 8. Valores do CGTC para cada módulo reacional.....	66

Nomenclatura

Letras Latinas

A	área (m^2);
A_e	área de convecção externa (m^2);
A_g	área de escoamento do gás de combustão (m^2);
A_i	área de escoamento da mistura reacional (m^2);
CGTC	coeficiente global de transferência de calor ($kcal/sm^2K$);
C_p	capacidade calorífica ($kcal/kgK$);
$\overline{C_p}$	capacidade calorífica da mistura ($kcal/kgK$);
C_{prod}	concentração dos produtos (kg/m^3);
C_{prod0}	concentração dos produtos inicial (kg/m^3);
$C_{prod(z)}$	concentração dos produtos na direção z (kg/m^3);
C_{p_f}	capacidade calorífica da mistura reacional ($kcal/kgK$);
C_{p_g}	capacidade calorífica do gás de combustão ($kcal/kgK$);
C_R	concentração de resíduos (kg/m^3);
C_{R0}	concentração de resíduos inicial (kg/m^3);
$C_{R(z)}$	concentração de resíduos na direção z (kg/m^3);
D	diâmetro do cilindro (m);
D_e	diâmetro externo do reator (m);
D_h	diâmetro hidráulico (m);
D_i	diâmetro interno do reator (m);
d_p	diâmetro da partícula (m);
E	energia de ativação (J/kg);
F_{obj}	função objetiva;
g	aceleração da gravidade (m/s^2);
GLP	gás liquefeito de petróleo;
Gr_1	número de Grashof;
$\Delta H_{reação}$	entalpia da reação química (J/kg);
h	coeficiente de transferência convectiva de calor ($kcal/msK$);

h_{conv}	coeficiente de transferência convectiva de calor(kcal/msK);
$h_{(\text{conv})e}$	coeficiente de transferência convectiva de calor do gás de combustão(kcal/msK);
h_f	coeficiente de transferência convectiva da mistura reacional (kcal/msK);
h_{gc}	coeficiente de transferência convectiva do gás de combustão (kcal/msK);
h_{nat}	coeficiente de transferência de calor natural ($^{\circ}\text{C}$);
k	número do reator;
k_1	constante da taxa ;
k_{10}	fator pré-exponencial (s^{-1});
k_g	condutividade térmica do gás de combustão (kcal/hm $^{\circ}\text{C}$);
k_i	condutividade térmica do composto puro (kcal/hm $^{\circ}\text{C}$);
$k_{\text{aço}}$	condutividade térmica do aço (kcal/hm $^{\circ}\text{C}$);
k_{cond}	condutividade térmica (kcal/msK);
k_{iso}	condutividade térmica do isolamento (kcal/hm $^{\circ}\text{C}$);
L	comprimento do cilindro (m);
\dot{m}_f	vazão mássica da mistura reacional (kg/h);
\dot{m}_g	vazão mássica do gás de combustão (kg/h);
\dot{m}_r	vazão mássica de resíduos (kg/h);
n_r	número de reatores;
Nu	número de Nussel;
Nu_{Dh}	número de Nussel;
\bar{p}	pressão média (atm);
P_{rod}	espécie genérica denominada produtos;
\overline{PM}	peso molecular médio;
PM	peso molecular;
Pr	número de Prandtl;
Q	taxa de transporte de calor;
q_x	taxa de fluxo de calor (kcal/h);



R	constante dos gases;
R	espécie genérica denominada resíduos;
r_1	espessura externa do reator (m);
r_2	espessura sem isolamento (m);
r_3	espessura do cilindro (m);
r_4	espessura interna do reator (m);
r_t	posição radial (m);
$R_{(conv)f}$	resistência a convecção da mistura reacional;
$R_{(conv)g}$	resistência a convecção do gás de combustão;
R_{nat}	resistência a convecção natural;
$R_{(cond)iso}$	resistência a condução do isolamento;
$R_{(cond)}$	resistência a condução do aço;
R_t	raio do tubo (m);
Ra_i	número de Rayleigh;
Re	número de Reynolds;
Re_{Dh}	número de Reynolds do diâmetro hidráulico;
Re_p	número de Reynolds da partícula;
R_{tot}	somatório das resistências (kcal/hm°C);
ΔT	gradiente de temperatura (°C);
\bar{T}	temperatura de entrada e saída do reator (°C);
T_{∞}	temperatura ambiente (°C);
T_{c_i}	temperatura crítica (°C);
T_f	temperatura da mistura reacional (°C);
T_{f0}	temperatura da mistura reacional inicial (°C);
T_f^{cal}	temperatura da mistura reacional calculada (°C);
T_f^{exp}	temperatura da mistura reacional experimental (°C);
T_g	temperatura do gás de combustão (°C);
T_{g0}	temperatura do gás de combustão inicial (°C);
T_g^{cal}	temperatura do gás de combustão calculada (°C);
T_g^{exp}	temperatura do gás de combustão experimental (°C);
T_s	temperatura da superfície do isolamento (°C);

T_{s1}	temperatura na superfície externa da carcaça ($^{\circ}\text{C}$);
T_{s2}	temperatura na superfície interna da carcaça ($^{\circ}\text{C}$);
T_{s3}	temperatura na superfície externa do reator ($^{\circ}\text{C}$);
T_{s4}	temperatura na superfície interna do reator ($^{\circ}\text{C}$);
U	coeficiente global de transferência de calor ($\text{kcal}/\text{sm}^2\text{K}$);
U_i	coeficiente global de transferência de calor interno ($\text{kcal}/\text{sm}^2\text{K}$);
U_e	coeficiente global de transferência de calor externo ($\text{kcal}/\text{sm}^2\text{K}$);
v	velocidade (m/s);
V_t	velocidade terminal da partícula (m/s);
v_z	velocidade na direção z (m/s);
$\overline{v_z}$	velocidade média (m/s);
$V_{z,\text{Max}}$	velocidade máxima na direção z (m/s);
y_i	fração mássica do gás i;
y_i, y_j	fração molar dos componentes i e j;
z	direção axial;

Letras Gregas

λ_{tri}	valor monoatômico da condutividade térmica;
ρ	densidade (kg/m^3);
ρ_p	densidade da partícula (kg/m^3);
$\overline{\rho_g}$	densidade média do gás (kg/m^3);
ρ_g	densidade do gás de combustão (kg/m^3);
ρ_f	densidade da mistura reacional (kg/m^3);
μ	viscosidade (kg/ms);
μ_i	viscosidade do componente puro (kg/ms);
$\overline{\mu_g}$	viscosidade do gás média (kg/ms);
μ_g	viscosidade do gás de combustão (kg/ms);

μ_f	viscosidade da mistura reacional (kg/ms);
β	coeficiente de expansão térmica ($^{\circ}\text{C}$);
ν	viscosidade cinemática (m^2/s);
λ_i	é a condutividade térmica com composto puro i ;
λ_m	condutividade térmica da mistura;

Siglas

DEQ	Departamento de Engenharia Química;
FEQ	Faculdade de Engenharia Química;
FURB	Universidade Regional de Blumenau;
LDPS	Laboratório de Desenvolvimento de Processos de Separação;
LFC	Laboratório de Fluidodinâmica Computacional;
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas;
UPMP	Unidade Piloto Multi-Propósito;
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo;
CLP	Controlador Lógico Programável

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação pelo Tema

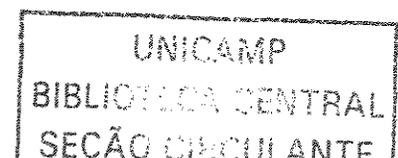
As questões ambientais têm despertado grande interesse e preocupação crescente na sociedade em geral, devido aos problemas diretamente ligados à qualidade de vida.

A comunidade científica, por sua vez, tem procurado soluções para minimizar as diversas formas de agressão ao meio ambiente. Devido, também, à evolução exponencial da produção de lixo no meio urbano, soluções precisam ser estudadas imediatamente visto que o tratamento e a disposição final adotados hoje estão tornando-se irreversíveis à medida que o tempo passa. Com o aumento do consumo, os problemas ambientais gerados com a produção, transporte, consumo e disposição de insumos demandam alternativas para o tratamento final de resíduos.

A pirólise como método alternativo vem se consolidando dentro deste prisma. A partir de 1973, com a crise de energia, a pirólise passou a ser exaustivamente estudada, pois como processo, é um dos menos irreversíveis. Ela permite a recuperação de energia através da decomposição térmica de resíduos em atmosfera controlada. Entretanto, apesar dos esforços empreendidos, muitos são os problemas que dificultam o desenvolvimento deste processo em escala comercial.

Considerando as dificuldades pode-se classificar a pirólise como um processo em desenvolvimento e sua aplicação como sistema de tratamento e destino final de resíduos, e carece estudos rigorosos, por oferecer elevado grau de incertezas. Todavia, com o avanço da tecnologia, este método pode tornar-se um instrumento de grande utilidade na luta contra a poluição.

Pretende-se, com essa dissertação de mestrado, discutir a pirólise como uma alternativa viável para tratamento de resíduos, com ênfase à descrição de uma metodologia



de simulação, projeto, construção e a proposta de metodologia para mudança de escala de processo.

A metodologia consiste na descrição da modelagem matemática unidimensional para a transferência de calor da unidade piloto multi-propósito de pirólise (UPMP) com e sem reação, simulação para projeto e construção do reator de leito móvel, obtenção de dados experimentais de temperatura ao longo do leito reacional, seguida de regressão dos dados experimentais para a obtenção do coeficiente global de transferência de calor, e dos parâmetros cinéticos relacionados ao calor absorvido pela reação endotérmica. Seguindo-se a perspectiva do desenvolvimento e mudança de escala do processo, acompanhado da construção, verificação e validação de modelos fenomenológicos de transferência de calor e massa.

1.2 Objetivos

Tem como objetivos específicos apresentar a pirólise como uma alternativa viável para tratamento de resíduos sólidos e o projeto baseado na resolução do modelo matemático, construção dos equipamentos e a montagem de uma planta piloto multi-propósito para pirólise de resíduos sólidos, que permita estudos de mudança de escala do processo.

Além disso, pretende-se apresentar o desenvolvimento e os testes de validação de uma metodologia experimental-numérica, para a determinação dos coeficientes globais de transferência de calor e dos parâmetros cinéticos globais associados à reação de pirólise, através de técnicas de simulação e regressão numérica (problema inverso). Vislumbra-se com esse procedimento, a comprovação da técnica de simulação para projeto, e aplicação da técnica nas mudanças de escala de processo de pirólise (“scale-up”).

1.3 Temática da Tese

- CAPÍTULO 2: apresenta-se a REVISÃO BIBLIOGRÁFICA das técnicas de pirólise aplicada a resíduos, utilizada como fundamento para o desenvolvimento e aplicação desta dissertação.
- CAPÍTULO 3: descreve-se a modelagem matemática e os métodos numéricos empregados no desenvolvimento dos objetivos propostos.
- CAPÍTULO 4: dá-se ênfase ao projeto da UPMP, descrição do fluxograma de processo e construção dos equipamentos da planta piloto.
- CAPÍTULO 5: apresenta-se os testes e estudos de caso numéricos e experimentais, e os principais resultados obtidos.
- CAPÍTULO 6: enfatiza-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Crê-se por fim, que o desenvolvimento deste trabalho possa, a despeito da modéstia, contribuir significativamente para o início de uma linha de pesquisa nos laboratórios LDPS da FEQ-UNICAMP e LFC, LDPS do DEQ-FURB, unificando a teoria com a prática nos estudos de simulação e desenvolvimento de processos químicos, e fortalecendo o trabalho em grupo de pesquisa multiinstitucional e multidisciplinar.

Capítulo 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Gerais

A pirólise, também conhecida como destilação destrutiva, é um processo de decomposição química por calor em atmosfera livre de oxigênio, em que a matéria orgânica pode ser convertida em subprodutos com viabilidade econômica. A reação de pirólise visa a degradação térmica de substâncias orgânicas de cadeia carbônica longa, para a formação de compostos de cadeia curta e de baixo peso molecular. A reação é endotérmica e acontece na faixa de temperatura compreendida entre 300 a 600°C. Estudos mais aprofundados sobre o assunto podem ser encontrado em Baum (1974).

Como técnica, vem sendo empregada em todo o mundo como uma alternativa à incineração de resíduos, que é o método mais usual na atualidade para a redução de volume de resíduos, principalmente por não causar grande impacto ambiental como, por exemplo, a geração de quantidades significativas de dioxinas, típicas das unidades de incineração. Os altos custos de controle de poluição para os incineradores, a alta energia contida nos polímeros assim como a composição química dos plásticos, por exemplo, demandam alternativas para tratamento destes resíduos e já são considerados como alternativas na geração de energia e de matéria-prima para outros processos químicos (Kaminsky, 1992; Plabmann e Schock, 1996, Bockhorn *et al*, 1998).

No Brasil emprega-se a pirólise com sucesso desde a década de 70 para a produção de óleos combustíveis e petroquímicos a partir do xisto betuminoso.

De acordo com Allred (1966) o xisto betuminoso é composto por material inorgânico inerte e material orgânico passível de decomposição pirolítica na forma de hidrocarbonetos fluidos. O material orgânico, por sua vez, pode apresentar concentrações variadas de querogênio, betume e resíduos de carbono. Um estudo experimental mostrou que simplificadamente, a cinética da pirólise de xisto pode ser representada por um

mecanismo de reação consecutiva de primeira ordem e irreversível, onde o querogênio se decompõe em betume, que por sua vez sofre decomposição na forma de gases e óleos leves.

De forma geral, tem-se como principais produtos da pirólise três frações que consistem de:

- Uma corrente de gás: geralmente contendo primariamente hidrogênio, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono e vários outros gases dependendo do tipo de material que está sendo pirolisado;
- uma corrente líquida: geralmente consiste de óleos onde podem ser encontrados centenas de compostos químicos como ácido acético, acetona, metanol, fenóis, hidrocarbonetos, álcoois e ácidos orgânicos de elevada densidade e baixo teor de enxofre;
- Sólido residual: esta consiste basicamente de carbono puro (carvão) e qualquer material inerte que pode ter sido alimentado no processo.

Uma das grandes dificuldades da pirólise, tanto na escala de laboratório quanto na escala piloto, é a variação dos produtos gerados. Isto se deve em muito à variações das condições de operação, como temperatura, aumento da temperatura, fluxo de gás, tempo de residência, materiais alimentados e outros parâmetros.

Na operação da pirólise a fluidização é a técnica efetiva para o arraste dos resíduos sólidos para a atmosfera controlada. Entende-se como fluidização a redução dos resíduos sólidos a partículas de tamanho menor a ponto serem arrastadas por transporte pneumático. Em muitos casos, os resíduos orgânicos são divididos em tamanhos muito pequenos o que condiciona a adição de materiais sólidos inertes, como areia, para dar estabilidade ao leito fluidizado (Baum, 1974).

2.2 Caracterização dos Resíduos

Resíduos sólidos são todos os lixos advindos da atividade humana e animal que estão normalmente no estado sólido, líquidos ou mistura deles e são descartados por já terem sido usados ou desnecessários. São considerados resíduos sólidos todos os sólidos ou semi-sólidos sem valor suficiente para serem reaproveitados com viabilidade econômica

por técnicas convencionais de tratamento ou disposição. Caracteriza-se os resíduos sólidos da seguinte maneira (Perry, 1998):

- Resíduos alimentícios: são resíduos de animais, frutas ou vegetais, resultantes do manuseio, preparação e cozimento de alimentos (também chamado de lixo orgânico). O mais importante é que este tipo de resíduo sólido é facilmente disposto e de rápida decomposição principalmente em ambientes quentes e úmidos como o clima equatorial.
- Refugo, entulho, lixo: são os resíduos combustíveis ou não-combustíveis excluindo-se resíduos alimentícios ou putrescíveis. Geralmente os resíduos combustíveis são papéis, papelão, plásticos, tecidos, borracha, couro, madeira e móveis. Os resíduos não combustíveis são itens como vidro, louça ou cerâmica, latas de alumínio, ferro, metais e resíduos da indústria de construção civil.
- Cinzas e resíduos de combustão: são resíduos da queima da madeira, carvão, coque e resíduos de outros combustíveis, termoelétricas, escória de carvão e materiais queimados ou parcialmente queimados.
- Resíduos de construções e demolições: são resíduos derivados da construção civil, geralmente oriundos de construções, reformas e demolições. São compostos por lama, pedras, concreto, tijolos, gesso, chapas e ripas de madeira, telhas, tubulações e partes elétricas.
- Lixos especiais: são resíduos como o lixo oriundo da limpeza de ruas, de margem de estradas, escombros e veículos abandonados.
- Resíduos de plantas industriais: aqui se encaixam os resíduos advindos das plantas de tratamento de água e esgoto de plantas industriais;
- Resíduos agrícolas: resíduos resultantes das diversas atividades agrícolas, como plantação, colheita, produção de leite, e criação de animais para abate.

Os polímeros fazem parte de uma grande parcela dos resíduos e são de origem natural ou sintética, constituídos basicamente por macromoléculas formadas por unidades que se repetem, dezenas e até centenas de vezes, ao longo de uma cadeia. As características dos polímeros variam muito, uma vez que dependem da natureza química e física das unidades repetitivas.

A degradação dos polímeros naturais como a celulose, por exemplo, é viável pois sofrem biodegradação com relativa facilidade. Já os polímeros sintéticos, derivados do petróleo, em sua maioria, apresentam alta resistência à degradação. Essa propriedade torna esse material muito desejado e utilizado nas atividades humanas, mas torna-se um grande problema quando é descartado em aterros sanitários e lixões.

Têm-se vários tipos de polímeros sintéticos, que podem ser classificados com base na estrutura química da molécula, na reação de obtenção do polímero, no comportamento termomecânico. A mais conhecida baseia-se no comportamento termomecânico: elastômeros e plásticos. Estes últimos se dividem em termoplásticos e termofixos.

Os termoplásticos são materiais capazes de serem repetidamente amolecidos e moldados pelo aumento de temperatura e endurecidos pela redução desta. Essas mudanças ocorrem devido à alterações físicas de suas moléculas e não por reações químicas.

Divididos em duas categorias, os termoplásticos são classificados de acordo com seu desempenho e durabilidade: termoplásticos convencionais e termoplásticos de engenharia. Os termoplásticos de engenharia diferenciam-se dos convencionais por apresentarem melhores propriedades mecânicas e térmicas, tenacidade a altas e baixas temperaturas e em aplicações de longa duração, porém têm custos bem maiores se comparados aos convencionais. Os mais conhecidos termoplásticos de engenharia são as poliamidas (NYLONS), policarbonatos (PC) e o polióxido de fenileno (NORYL).

Entre os convencionais está a maioria dos resíduos poliméricos encontrados nos lixões, aterros sanitários e cursos dos rios, principalmente na forma de embalagens plásticas diversas: garrafas de refrigerante, água, óleo, copos e pratos descartáveis, sacolas de supermercado e de lixo etc. Os polímeros mais usados para esses tipos de aplicações são: as poliolefinas (LDPE, LLDPE, HDPE, PP), o poliestireno (PS) e seus derivados, poli(cloreto) de vinila(PVC) e poli(tereftalato) de etileno(PET), (Manrich, 1997).

2.3 Aplicações

A pirólise é empregada principalmente no Brasil, no processamento do xisto betuminoso que leva a decomposição da fração orgânica, em torno de 8% em massa, denominada betume, é decomposta primeiramente em querogênio que, por sua vez, se

decompõe em produtos como óleos leves, gás combustível, nafta, etc., através da cinética consecutiva de primeira ordem. Diversos estudos de viabilidade técnica e econômica realizados nos últimos 30 anos conferem um domínio nacional desta tecnologia.

A pirólise de biomassa é uma importante fonte renovável de energia, combustíveis e materiais. Os gases resultantes da pirólise de biomassa têm alto poder calorífico e podem ser aproveitados das mais diversas formas. O óleo pirolenhoso gerado a partir dos condensáveis também possui aplicações variadas desde o uso “in natura” como defensivo agrícola e até como fonte de matéria-prima para a produção de fármacos e produtos de química fina.

O carvão vegetal é um energético muito consumido no Brasil, principalmente na siderurgia, mas o alcatrão, também conhecido como bio-óleo, tem grande potencial mercadológico. O Brasil como grande produtor de biomassa, seja lenha de eucalipto reflorestado, bagaço de cana, casca de café, galhos de árvores, óleos vegetais extrativos e demais espécies plantadas como dendê, soja, mamona, amendoim, etc., além do lixo urbano e esterco de animais, apresenta-se como um potencial absorvedor da tecnologia da pirólise de biomassa.

A obtenção de micro-sílica através da pirólise de casca de arroz é uma outra aplicação possível para o processo de pirólise.

Os resíduos plásticos têm grande potencial para a pirólise, visto que o consumo destes cresce a cada ano e, conseqüentemente, o montante de resíduos. Presentes em quantidades consideráveis no lixo municipal, os produtos obtidos com a pirólise de resíduos poliméricos que podem ser usados novamente como matéria-prima para a produção de polímeros virgens, óleos e gases combustíveis vem sendo objeto de estudo em todo o mundo.

Areias de fundição que são compostas de resinas fenólicas e alquílicas também podem ser objeto de estudo, a fim de pirolisar as resinas visando à recuperação das areias e evitando a disposição destas em aterros sanitários.

Os componentes eletrônicos de computadores, televisores, aparelhos de som entre outros, que podem ser encontrados em abundância, também, podem ser pirolisados, com o objetivo de recuperação dos metais preciosos, como o ouro, a prata e a platina (Hairston, 2002).

Aproximadamente 15 milhões de toneladas de pneus viram resíduos todos os anos na Europa (Murena, 2000). A maioria é disposta em aterros, que além de ocupar grande espaço não se degradam, o que gera um grave problema ambiental. Seu alto poder calorífico e os gases e líquidos combustíveis gerados a partir da reação de pirólise o tornam um grande nicho de mercado. Atualmente no Brasil a PETROBRAS possui uma planta para pirólise de pneus em São Mateus do Sul – PR, e vem realizando estudos com a elevação do teor de orgânicos do xisto com a adição de frações de pneus.

2.4 Termogravimetria

A termogravimetria é a técnica mais comumente usada para determinar os parâmetros cinéticos “puros” da reação de pirólise, apesar de ampla variação das condições experimentais e envolvem amplas faixas de temperatura, quantidades de amostras, taxas de transferência de calor, atmosferas de reação e pressões. Muitos autores descrevem a decomposição térmica por uma equação da Lei da Potência através de uma isoterma e/ou experimentos dinâmicos, que dependem da atmosfera, taxa transferência de calor e tamanho da amostra. A ordem da reação tem sido determinada entre 0 e 1, considerando que os parâmetros cinéticos mostram uma variação mais significativa. Estas diferenças têm sido associadas a diferentes causas como a existência de perfis de temperatura dentro da amostra, uma transferência de calor entre o sistema e a temperatura das amostras, influência da taxa de transferência de calor no decorrer da decomposição e a existência de um complexo mecanismo de reação (Ceamanos *et al.*, 2002).

Os resíduos mais estudados pela termogravimetria são os poliméricos, devido a sua abundância nos grande centros urbanos.

Neste trabalho ao invés de se adotar a termogravimetria como técnica para estudos cinéticos de pirólise de resíduos, pretende-se propor uma metodologia para a obtenção de parâmetros cinéticos mesmo que mascarados pela transferência de calor e massa, com o intuito de validação do modelo para estudos posteriores de ampliação de escala do processo.

2.5 Estado da Arte

No Brasil o estudo da pirólise começou com a pirólise de xisto betuminoso na década de 70. Vários estudos, nesse sentido, foram desenvolvidos com o objetivo de ampliação de escala deste processo. Martignoni (1987) desenvolveu um estudo preliminar da modelagem de pirólise de finos de xisto em leito de arraste. Em 1990, Meier propôs uma modelagem matemática unidimensional em regime permanente para um reator de leito móvel para a pirólise de finos de xisto, resultante do processo principal desenvolvido pela Petrobrás conhecido como processo Petrosix, com estudos de simulação numérica e otimização. Estes trabalhos serviram de base para a construção do modelo empregado na simulação da planta piloto multi-propósito enfocada nesta dissertação.

Dentre os trabalhos citados na literatura, a pirólise de resíduos plásticos é a que vem recebendo grande atenção e vários estudos estão sendo realizados.

Kaminsky *et al.* (1995) estudaram a degradação térmica de polietileno em um reator de leito fixo na faixa de temperatura de 773 a 873 K e obtiveram produtos refinados de interesse da indústria petroquímica. Resultados similares foram obtidos por Williams e Williams (1997, 1998) que fizeram a análise dos produtos derivados da reação de pirólise de resíduos poliméricos, e estudaram a pirólise de polietileno de baixa densidade num reator de leito móvel na faixa de 773 a 973 K, para produzir produtos intermediários da indústria petroquímica. Os principais produtos encontrados na corrente gasosa foram hidrogênio, metano, eteno, etano, propeno, proprano, buteno e butano. Segundo Williams a fração da corrente gasosa aumenta com o aumento da temperatura de pirólise. Os óleos derivados e o carvão resultante têm grande potencial para serem reaproveitados, novamente, na indústria petroquímica, para a produção de novos plásticos ou combustíveis refinados.

A ultrapirólise de polietileno de baixa densidade em um reator circular de leito móvel foi estudada por Behie *et al.* (1997, 1998). Eles concluíram que alta temperatura e reduzido tempo de residência favorecem a conversão de polietileno em olefinas.

Filomena Pinto *et al.* (1998), destacam que os resíduos plásticos podem ser convertidos em hidrocarbonetos com viabilidade econômica, e possuem uso tanto como

combustíveis quanto produtos intermediários da indústria petroquímica. A adição de catalisadores pode aumentar a qualidade dos produtos e promover a seletividade.

A utilização de resíduos plásticos para a recuperação de matéria-prima foi estudada por Bockhorn e Hornung (1998), que obtiveram a dehidrocloração do PVC (polivinil-cloro) em 330°C, a 380°C os monômeros aparecem entre os produtos, e a partir de 440°C grandes quantidades de hidrocarbonetos. Os produtos resultantes da pirólise de resíduos plásticos dependem diretamente da mistura alimentada e da faixa de temperatura empregada.

Milne *et al.* (1999) investigaram a pirólise de polietileno de baixa densidade em reator piloto, e analisaram a influência da temperatura e tempo de residência na composição do gás pirolisado.

A pirólise de circuitos eletrônicos produz aproximadamente 40.6% de óleos, 24.9% de gases não condensáveis e 34,5% de resíduos sólidos. A fração dos óleos produzidos pela pirólise de circuitos eletrônicos são compostos primeiramente por nafta leve e gases pesados condensáveis (Chien *et al.*, 2000).

A cinética de formação de compostos sulfurosos nos processos de pirólise de pneus foi investigada por Murena (2000), com aproximadamente 1% do enxofre presente retido na fase líquida e o restante forma H₂S na fase gás.

A conversão de plásticos em combustíveis através de processo de pirólise de PVC à vácuo a 623 K de temperatura promovendo a decloração, e a conseqüente degradação térmica na presença de nitrogênio a temperatura na faixa de 673K a 723 K em reator batelada, foi apresenta por Tamer *et al.* (2001).

A pirólise de óleo sujo em reator de leito fluidizado foi avaliada por Schmidt e Kaminsky (2001). Os autores empregaram um reator pirolítico que operou a 460 e 650°C e observaram que os produtos continham entre 70 e 84% do óleo e sua distribuição nos produtos depende das características da alimentação e das condições de operação da pirólise.

A influência do tempo de residência e da temperatura sobre a qualidade dos produtos e composição dos gases, para a pirólise de polietileno de alta densidade em reator de leito fluidizado, foi investigada com profundidade por Mastral *et al.* (2002).

2.6 Aspectos para Investigação

Tendo em vista o levantamento bibliográfico efetuado e a relevância da pirólise como alternativa para o tratamento de resíduos sólidos, achou-se pertinente a realização dos seguintes estudos:

- Estudo da pirólise de resíduos em reator contínuo de leito móvel em escala piloto, com desenvolvimento de modelo, simulação e projeto de uma planta piloto;
- Construção dos equipamentos e a montagem da unidade;
- Implantação de um sistema de aquisição de dados experimentais;
- Proposta de uma metodologia para determinação de parâmetros térmicos e cinéticos;
- Ajustes e implementação de um modelo unidimensional permanente para estudos de projeto e mudança de escala do processo.

Capítulo 3

3 MODELAGEM MATEMÁTICA E MÉTODOS NUMÉRICOS

Nesta seção apresenta-se a modelagem matemática usada para os testes numéricos de predição dos perfis de temperatura e concentração ao longo do leito reacional modular, e para o projeto por simulação de uma unidade piloto multi-propósito para pirólise de resíduos sólidos. Apresenta-se, também, as estratégias numéricas usadas para simulação e para a predição de parâmetros térmicos e cinéticos do modelo matemático.

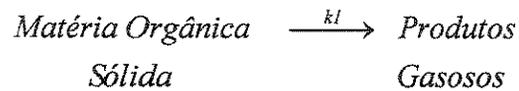
3.1 Equações de Conservação

As simplificações assumidas para o modelo são:

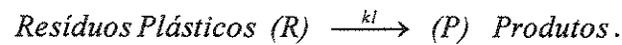
- sem dispersão radial e axial de calor, devido ao predomínio dos termos convectivos;
- variação axial mais significativa a ponto de justificar um modelo unidimensional;
- regime permanente para estudos de simulação para projeto do processo contínuo;
- conservação para a mistura gás-sólido considerando-se o sistema diluído o suficiente para que o arraste seja total e os efeitos térmicos interfases negligenciáveis. Vide Figura 1;
- radiação desprezível nos processos de transferência entre a mistura reacional e os gases de combustão com as paredes do reator.

3.1.1 Modelo Cinético/Conservação da Massa

Considera-se por simplicidade de análise uma cinética de pseudo 1ª ordem onde a matéria orgânica sólida é volatilizada em produtos gasosos, seguindo a estequiometria¹:



ou,



Um balanço de massa para uma espécie química genérica R , para o módulo reacional k , exemplificado pela Figura 1, pode ser expresso, com as hipóteses assumidas anteriormente, por:

$$\left(\frac{dC_R}{dz} \right)_k = -\frac{I}{v_z} (k_I \cdot C_R)_k \quad (1)$$

Com $k = 1, \dots, n_r$ e $(C_R)_k(z)$.

Da mesma forma para a espécie genérica Prod:

$$\left(\frac{dC_{Prod}}{dz} \right)_k = \frac{I}{v_z} (k_I \cdot C_R)_k \quad (2)$$

¹ A adoção de um sistema “Lumped” para a cinética da pirólise tem sido utilizada com sucesso em estudos de escalada de processo pirolítico (Meier (1990), Martignoni (1987)).

Com $k = 1, \dots, n_r$ e $(C_{prod})_k(z)$

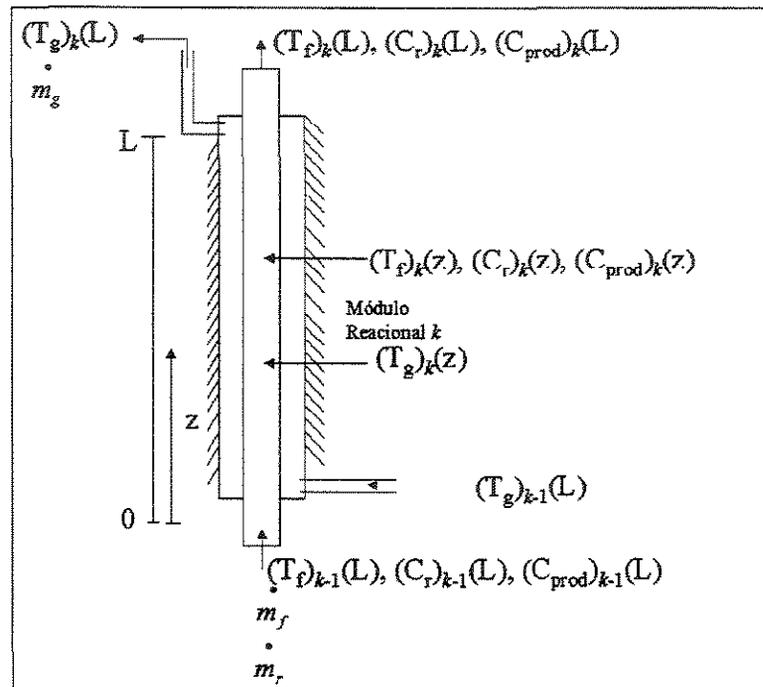


Figura 1. Esquema do módulo reacional k

A constante de velocidade de reação da temperatura da mistura reacional é dada de acordo com a Lei de Arrhenius:

$$k_i = k_{i0} e^{\frac{E}{R \cdot (T_f)_k(z)}} \quad (3)$$

Onde:

$k_i \equiv$ constante da taxa;

$k_{i0} \equiv$ fator pré-exponencial;

$E \equiv$ energia de ativação para a reação;

$(T_f)_k(z) \equiv$ temperatura da mistura reacional;

$v_z \equiv$ velocidade média na direção z ;

$(C_R)_k(z) \equiv$ concentração da espécie genérica resíduos;

$(C_{prod})_k(z) \equiv$ concentração da espécie genérica produtos;

3.1.2 Modelo Térmico/Conservação da Energia

Um balanço de energia térmica para a mistura reacional, considerando-se a transferência entre o gás de combustão e a mistura reacional, e o consumo térmico pela reação endotérmica em um reator genérico k , pode ser expresso por:

$$\left(\frac{dT_f}{dz}\right)_k = \left[\frac{U_i \cdot \pi \cdot D_i (T_g - T_f)}{Cp_f \cdot \dot{m}_f} - \frac{\Delta H_{\text{reação}} \cdot k_l \cdot C_R \cdot \frac{\pi \cdot D_i^2}{4}}{Cp_f \cdot \dot{m}_f} \right]_k \quad (4)$$

Onde :

Cp_f : é capacidade calorífica da mistura reacional;

\dot{m}_f é a vazão mássica da mistura reacional;

U_i é o coeficiente global de transferência de calor interno;

D_i é o diâmetro interno do reator;

T_g é a temperatura do gás de combustão;

$\Delta H_{\text{reação}}$ é a entalpia da reação química;

Para a seção de aquecimento o balanço de energia térmica para o gás de combustão fica:

$$\left(\frac{dT_g}{dz}\right)_k = \left[\frac{U_i \cdot \pi D_i (T_g - T_f)}{Cp_g \cdot \dot{m}_g} - \frac{U_e \cdot \pi \cdot D_e (T_g - T_\infty)}{Cp_g \cdot \dot{m}_g} \right]_k \quad (5)$$

Onde:

T_∞ é temperatura ambiente;

Cp_g é a capacidade calorífica do gás de combustão;

\dot{m}_g é a vazão mássica do gás de combustão;

D_e é o diâmetro externo do reator;

U_e é o coeficiente global de transferência de calor externo.

As condições de entrada para o primeiro reator são:

$$\begin{aligned}
 z = 0 &\rightarrow C_R(0) = C_{R_0} \\
 z = 0 &\rightarrow C_{Pr od}(0) = C_{Pr od_0} \\
 z = 0 &\rightarrow T_f(0) = T_{f_0} \\
 z = 0 &\rightarrow T_g(0) = T_{g_0}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

3.1.3 Equações Constitutivas

Para o cálculo dos coeficientes globais de transferência de calor (U_i e U_e), necessita-se conhecer os coeficientes de transferência convectiva de calor (h_{conv}) no interior do reator, na seção de escoamento do gás de combustão e da superfície externa para o ambiente além das resistências condutivas de transferências de calor.

A Figura 2 ilustra uma analogia térmica que caracteriza as várias resistências à transferência de calor.

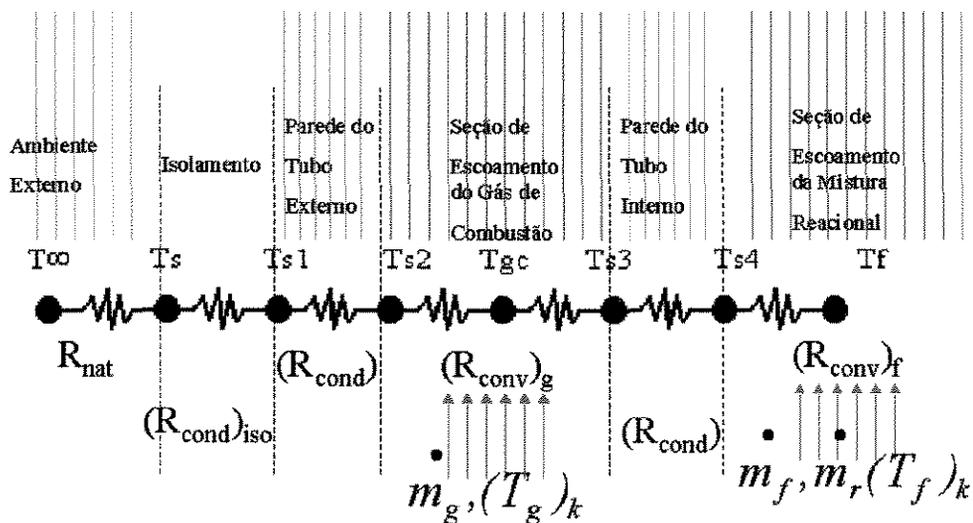


Figura 2. Analogia térmica para a transferência de calor.

O cálculo do coeficiente de transferência convectiva na seção de escoamento do gás de combustão é realizado através do cálculo da vazão volumétrica de gases e de sua velocidade média, seguido da determinação do número de Reynolds, para o diâmetro hidráulico da seção anular:

$$Re_{Dh} = \frac{\rho_g \cdot v_g \cdot D_h}{\mu_g} \quad (7)$$

onde:

D_h é o diâmetro hidráulico;

ρ_g é a densidade do gás de combustão;

v_g é a velocidade média do gás de combustão;

μ_g é a viscosidade do gás de combustão.

Com a correlação de Colburn (Incropera, 1990):

$$Nu_{Dh} = 0,023 \cdot Re_{Dh}^{\frac{4}{5}} \cdot Pr_g^n \quad (8)$$

onde $n=0.4$ para o aquecimento e $n=0.3$ para o resfriamento, pode-se calcular o coeficiente de transferência convectiva do gás de combustão através da equação:

$$h_{(conv)e} = \frac{Nu_{Dh} \cdot k_g}{D_h} \quad (9)$$

onde:

$Pr = \frac{Cp_g \cdot \mu_g}{k_g}$ é o número de Prandtl;

Nu_{Dh} é o número de Nussel;

k_g é a condutividade térmica do gás de combustão;

Cp_g é a capacidade calorífica do gás de combustão;

Para o cálculo do coeficiente de transferência convectiva da mistura reacional analisa-se inicialmente as condições mínimas de velocidade do gás para o transporte pneumático da fase sólida. Considerou-se que o diâmetro médio das partículas seja d_p e que sua velocidade terminal possa ser expressa pela equação:

$$V_t = 1,73 \sqrt{\frac{g \cdot d_p \cdot (\rho_p - \rho_f)}{\rho_f}} \quad (10)$$

onde:

- g é a força gravitacional;
- d_p é o diâmetro da partícula;
- ρ_p é a densidade da partícula;
- ρ_f é a densidade do gás;

e que é valida para a faixa de n° de Reynolds da partícula compreendida entre $1000 < Re_p < 350000$ com:

$$Re_p = \frac{\rho_f \cdot V_t \cdot d_p}{\mu_f} \quad (11)$$

onde:

- Re_p é o número de Reynolds para a partícula;
- V_t é a velocidade terminal da partícula;
- μ_f é a viscosidade do gás;

Com o valor da velocidade terminal das partículas assume-se uma velocidade da mistura reacional superior em no mínimo 10% da velocidade mínima de transporte (V_t) para garantir o arraste das partículas através do leito. De posse desta velocidade utilizou-se às equações (8) e (9) para o cálculo do coeficiente de convecção forçada para a mistura reacional analogamente ao caso do gás de combustão.

Para a determinação do coeficiente de convecção natural Churchill e Chu (Incropera , 1990) recomendam uma correlação que pode ser aplicada sobre todo o domínio de Rayleigh(Ra_1) onde:

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra_i^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (12)$$

onde Ra_i é calculado através da expressão,

$$Ra_i = Gr_i \cdot Pr \quad (13)$$

e o número de Grashof (Gr_i) é expresso pela equação:

$$Gr_i = \frac{g \cdot \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^3} \quad (14)$$

onde β é o coeficiente de expansão térmica que para gases ideais tem uma relação inversa com a temperatura:

$$\beta = \frac{1}{T_\infty} \quad (14)$$

e:

ν é a viscosidade cinemática do ar;

T_s é a temperatura da superfície esterna;

Gr_i é o número de Grashof;

Ra_i é o número de Rayleigh;

β é o coeficiente de expansão térmica;

L é o comprimento do cilindro.

Segundo Churchill estas equações podem ser aplicadas a cilindros verticais de altura L desde que a espessura da camada limite δ seja menor que o diâmetro do cilindro. Esta condição é satisfeita se:

$$\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr_l^{1/4}} \quad (15)$$

e, portanto com o valor de Nu pode-se calcular o coeficiente de convecção natural pela equação (9).

Tem-se, genericamente, que a taxa de transporte de calor é dada pela equação:

$$Q = U.A.\Delta T \quad (16)$$

sendo que :

$$U.A = \frac{1}{R_{tot}} \quad (17)$$

em que R_{tot} é o somatório dos valores das resistências em conformidade com a Figura 2.

Com os valores dos coeficientes de transferência convectiva e o valor das resistências, pode-se calcular os valores dos coeficientes globais de transferência de calor.

Além disso, é importante notar que o modelo necessita de dois valores de coeficiente global de transferência de calor:

- Um para a mistura reacional, baseado na área interna do reator,

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_g \cdot A_g} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_4}}{2 \cdot \pi \cdot k_{aco} \cdot L} + \frac{1}{h_f \cdot A_i}} \quad (18)$$

- E outro para o gás de combustão que considera o isolamento do reator e a convecção natural externa:

$$U_e = \frac{1}{\frac{1}{h_{nat} A_e} + \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{2\pi k_{iso} L} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_3}}{2\pi k_{aco} L} + \frac{1}{h_g A_g}} \quad (19)$$

em que:

h_g é o coeficiente de transferência convectiva para o gás de combustão;

h_f é o coeficiente de transferência convectiva para a mistura reacional;

h_{nat} é o coeficiente de transferência convectiva natural externa;

A_e é a área de convecção natural externa;

A_g é a área de escoamento do gás de combustão;

A_i é a área de escoamento da mistura reacional;

k_{iso} é a condutividade térmica do isolamento;

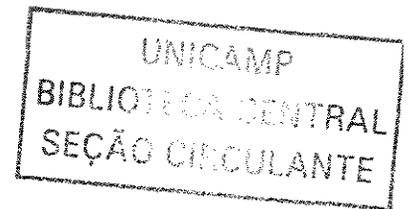
k_{aco} é a condutividade térmica do aço carbono;

r_1 é a espessura externa do reator;

r_2 é a espessura sem isolamento;

r_3 é a espessura do cilindro;

r_4 é a espessura interna do reator;



Para o projeto do reator os coeficientes globais U_i e U_e são preditos pelas correlações empíricas apresentadas, enquanto que nos estudos de validação e implementação, com os dados experimentais os mesmos parâmetros devem ser ajustados numericamente por técnicas apropriadas apresentadas e discutidas no item 3.3.

3.2 Propriedades Físicas

As propriedades físicas tanto do gás de combustão como da mistura reacional são preditas assumindo que os gases comportam-se como uma mistura ideal de gases ideais que variam em função da temperatura e da composição. As propriedades físicas do GLP (gás

liquefeito de petróleo) foram obtidas através do software CGComb 1.0 distribuído pela G.Greco Termofluidodinâmica e Consultoria Ltda.

3.2.1 Massa Específica

A massa específica média é calculada como uma função da composição, pressão e temperatura, pela equação:

$$\overline{\rho_g} = \frac{\overline{PM} \cdot \overline{p}}{R \cdot \overline{T}} \quad (20)$$

onde:

$$\overline{PM} = \sum_{i=1}^n y_i PM_i \quad (21)$$

é o peso molecular médio da mistura de gases, e y_i é a fração mássica do gás i presente na mistura, e \overline{p} e \overline{T} são a pressão e a temperatura médias entre a entrada e saída do reator, respectivamente.

3.2.2 Viscosidade Molecular

A viscosidade molecular dos gases de combustão pode ser predita da mesma forma que a massa específica, usando o método de Wilke (Reid 1988), que é expresso da forma:

$$\overline{\mu_g} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i \mu_i}{\sum_{j=1}^n y_j \phi_{ij}} \right) \quad (22)$$

com

$$\phi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \left(\frac{PM_j}{PM_i} \right)^{1/4} \right]}{\left[\left(1 + \frac{PM_i}{PM_j} \right) \right]^{1/2}} \quad (23)$$

Enquanto a viscosidade molecular de gases puros, μ_i , pode ser calculada pela correlação de Chung (Reid, 1988):

$$\mu_i = \frac{40,785 F_{c_i} (\overline{PM_i T})^{1/2}}{V_{c_i}^{2/3} \Omega_i} \quad (24)$$

com

$$\Omega_i = \left[A(T_i^*)^{-B} \right] + C \left[\exp(-DT_i^*) \right] + E \left[\exp(-FT_i^*) \right] \quad (25)$$

onde:

$$A=1.16145,$$

$$B=0.14874,$$

$$C=0.52487,$$

$$D=0.77320,$$

$$E=2.16178 \text{ e}$$

$$F=2.43787$$

são constantes do modelo e,

$$T_i^* = 1,2593T_r \quad (25)$$

com a temperatura reduzida da espécie i,

$$T_r = \frac{\overline{T}}{T_{c_i}} \quad (27)$$

onde T_{c_i} é a temperatura crítica da espécie química i .

3.2.3 Condutividade Térmica

A condutividade térmica de compostos puros pode ser calculada da seguinte maneira:

$$k_i = A_i + B_i \bar{T} + C_i \bar{T}^2 + D_i \bar{T}^3 \quad (28)$$

E a condutividade térmica da mistura pode ser expressa de uma forma análoga à relação teórica da viscosidade da mistura:

$$\lambda_m = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \lambda_i}{\sum_{j=1}^n y_j A_{ij}} \quad (29)$$

E, segundo a modificação de Mason e Saxena (Reid, 1988) A_{ij} pode ser expresso por,:

$$A_{ij} = \frac{\varepsilon \left[1 + \left(\frac{\lambda_{T_{r_i}}}{\lambda_{T_{r_j}}} \right)^{1/2} \left(\frac{PM_i}{PM_j} \right)^{1/4} \right]^2}{\left[8 \left(1 + \frac{PM_i}{PM_j} \right) \right]^{1/2}} \quad (30)$$

onde:

PM é o peso molecular da espécie química i ;

$\lambda_{T_{r_i}}$ é o valor monoatômico da condutividade térmica;

ε é uma constante numérica;

Mason e Saxena propuseram um valor de 1.065 para ε , e Tondon e Saxena mais tarde propuseram o valor de 0.85. O valor recomendado para este caso, de acordo com Reid (1988) é de 1.

3.2.4 Capacidade Calorífica

A capacidade calorífica da mistura pode ser calculada como um média das capacidades caloríficas dos componentes puros levando-se em consideração uma ponderação dada pela fração mássica de cada componente na mistura. A capacidade calorífica é uma função cúbica da temperatura,

$$C_{p_i} = A_i + B_i \bar{T} + C_i \bar{T}^2 + D_i \bar{T}^3 \quad (31)$$

onde A, B, C e D são constantes e específicas para cada espécie química.

Portanto, a capacidade calorífica da mistura ideal de gases puros como função das espécies químicas envolvidas e da temperatura fica:

$$\bar{C}_p = \sum_i \frac{y_i C_{p_i}}{PM} \quad (32)$$

A Tabela 1 apresenta a composição básica do gás de combustão, e suas respectivas propriedades e parâmetros constitutivos. E a Tabela 2 apresenta a composição básica da mistura reacional e suas propriedades e parâmetros constitutivos.

Tabela 1. Composição Básica, propriedades e parâmetros do gás de combustão

Composição	Fração Mássica	Massa Molecular (g/mol)	Temperatura Crítica (K)	Pressão Crítica (atm)	Volume Crítico (cm ³ /mol)	Fator Acêntrico	Momento Dipolar (Debyes)	Calor Específico CPA	Calor Específico CPB
Oxigênio (O ₂)	0.099	32	154.6	49.8	73.4	0.021	0	28.11	-0.00000368
Gás Carbônico(CO ₂)	0.0601	44	304.2	72.8	94	0.224	0	19.8	0.07344
Dióxido de Enxofre(SO ₂)	0.0001	64	430.8	77.8	122	0.273	1.6	23.85	0.06699
Nitrogênio (N ₂)	0.7481	28	126.2	33.5	89.5	0.04	0	31.25	-0.01357
Vapor de água(H ₂ O)	0.0927	18	647.1	217.6	56	0.348	1.8	32.24	0.001924

Tabela 1. Continuação

Composição	Calor Específico CPC	Calor Específico CPD	Condutividade Térmica KA	Condutividade Térmica KB	Condutividade Térmica KC	Condutividade Térmica KD
Oxigênio (O ₂)	0.00001746	-1.065E-08	-0.0003273	0.00009966	-3.743E-08	9.7343E-12
Gás Carbônico(CO ₂)	-0.00005602	1.715E-08	-0.007215	0.00008015	5.477E-09	-1.053E-11
Dióxido de Enxofre(SO ₂)	-0.00004961	1.328E-08	-0.008086	0.00006344	-1.382E-08	2.303E-12
Nitrogênio (N ₂)	0.0000268	-1.168E-08	0.0003919	0.00009816	-5.067E-08	1.504E-11
Vapor de água(H ₂ O)	0.00001055	-3.596E-08	0.007341	-0.00001013	1.801E-07	-9.1E-11

Tabela 2. Composição básica, propriedades e parâmetros da mistura reacional

Composição	Fração Mássica	Massa Molecular (g/mol)	Temperatura Crítica (K)	Pressão Crítica (atm)	Volume Crítico (cm ³ /mol)	Fator Acêntrico	Momento Dipolar (Debyes)	Calor Específico CPA	Calor Específico CPB
Oxigênio (O ₂) Gás	0.0001E-5	32	154.6	49.8	73.4	0.021	0	28.11	-0.00000368
Carbônico(CO ₂)	0.0001E-5	44	304.2	72.8	94	0.224	0	19.8	0.07344
Dióxido de Enxofre(SO ₂)	0.0001E-5	64	430.8	77.8	122	0.273	1.6	23.85	0.06699
Nitrogênio (N ₂)	0.9999	28	126.2	33.5	89.5	0.04	0	31.25	-0.01357
Vapor de água(H ₂ O)	0.0001E-5	18	647.1	217.6	56	0.348	1.8	32.24	0.001924

Tabela 2. Continuação

Composição	Calor Específico CPC	Calor Específico CPD	Condutividade Térmica KA	Condutividade Térmica KB	Condutividade Térmica KC	Condutividade Térmica KD
Oxigênio (O ₂) Gás	0.00001746	-1.065E-08	-0.0003273	0.00009966	-3.743E-08	9.7343E-12
Carbônico(CO ₂)	-0.00005602	1.715E-08	-0.007215	0.00008015	5.477E-09	-1.053E-11
Dióxido de Enxofre(SO ₂)	-0.00004961	1.328E-08	-0.008086	0.00006344	-1.382E-08	2.303E-12
Nitrogênio (N ₂)	0.0000268	-1.168E-08	0.0003919	0.00009816	-5.067E-08	1.504E-11
Vapor de água(H ₂ O)	0.00001055	-3.596E-08	0.007341	-0.00001013	1.801E-07	-9.1E-11

3.3 Métodos Numéricos

Pode-se distinguir duas estratégias numéricas distintas empregadas na metodologia apresentada: uma para solução do sistema de equações diferenciais ordinárias de primeira ordem (Eqs. de 1 a 6); e outra proposta para o ajuste numérico de parâmetros empíricos do modelo.

3.3.1 Solução Numérica do Modelo

Para a simulação do reator pirolítico multi-propósito, usou-se o método tradicional de Runge-Kutta de quarta ordem, conforme apresentado por Davis (1978). Os estudos de simulação foram empregados para o projeto térmico dos módulos reacionais e apresentaram boas taxas de convergência e estabilidade numérica.

3.3.2 Método dos Mínimos Quadrados

O método dos mínimos quadrados é a estratégia de regressão proposta para a regressão dos parâmetros térmicos e cinéticos e pode ser definido da seguinte forma (Nunhez, 1998):

Dado um conjunto de N pontos experimentais (X_i, Y_i) , que se supõe serem representados por um modelo de tipo $y=f(x; a_1, \dots, a_p)$, o objetivo é a determinação dos parâmetros a_j do modelo. Assume-se que a variável X é isenta de erros e todo erro experimental é associado a variável Y .

A maximização da Equação 2 aplicada a uma variável, considerando seus desvios padrões constantes em todos os pontos experimentais, fornece a função objetiva E que deve ser minimizada:

$$E = \sum_{i=1}^N \epsilon_{y_i}^2 = \sum_{i=1}^N (Y_i - y_i)^2 = \text{mínimo} \quad (33)$$

onde:

$$y_i = f(x_i; a_1, \dots, a_p) \quad , \quad i = 1, \dots, N \quad (34)$$

$$x_i = X_i \quad , \quad i = 1, \dots, N \quad (35)$$

3.3.3 Ajuste Numérico de Parâmetros

Pode-se caracterizar dois problemas inversos distintos que compõe a estrutura numérica da metodologia proposta: primeiramente a regressão numérica é conduzida para os módulos operando sem reação química, e as medidas experimentais de temperatura no reator (7 pontos), temperatura dos gases de combustão (6 pontos), e as medidas de vazão mássica do gás de combustão (\dot{m}_g) e da mistura reacional (\dot{m}_r), juntamente com o modelo térmico, são empregadas para regredir valores dos coeficientes globais de transferência de calor $((U_i)_k$, com $k=1, \dots, nr$) (Problema 1); em um segundo momento, o sistema é conduzido com reação e novas medidas de temperatura juntamente com os coeficientes globais regredidos anteriormente, são empregados com os modelos térmico e cinético para regressão dos parâmetros k_{10} , E e ΔH_r e, conseqüentemente, para avaliação de uma pseudo cinética contaminada pelos efeitos de transferência de calor e massa (Problema 2).

O método numérico para a regressão dos parâmetros empregado nesta metodologia é o método padrão dos mínimos quadrados. Do ponto de vista de programação matemática, os dois problemas podem ser escritos como:

- Problema 1:

Minimizar,

$$F_{\text{obj}} = \sum_{i=1}^6 (T_{g_i}^{\text{exp}} - T_{g_i}^{\text{cal}})^2 + \sum_{i=1}^7 (T_{f_i}^{\text{exp}} - T_{f_i}^{\text{cal}})^2 \quad (34)$$

Sujeita a,

$$(U_i)_k > 0 \quad \text{com } k = 1, \dots, nr$$

e Modelo Térmico (eqs. de 4 a 6)

- Problema 2,

Minimizar,

$$F_{\text{obj}} = \sum_{i=1}^6 (T_{g_i}^{\text{exp}} - T_{g_i}^{\text{cal}})^2 + \sum_{i=1}^7 (T_{f_i}^{\text{exp}} - T_{f_i}^{\text{cal}})^2 \quad (35)$$

Sujeita a,

Modelo Cinético e Térmico (eqs. de 1 a 6)

Como os métodos numéricos empregados neste trabalho são padrões e largamente conhecidos pela comunidade científica, achou-se pertinente a não apresentação detalhada dos algoritmos. Mais detalhes podem ser encontrados com profundidade no livros de Chapra e Canale (1990).

Capítulo 4

4 PROJETO E CONSTRUÇÃO DA UNIDADE PILOTO MULTI-PROPÓSITO

Este capítulo trata do projeto, construção e a montagem da UPMP, com uma descrição detalhada do fluxograma de processo, dos equipamentos e dos testes numéricos empregados como estratégia de simulação para projeto.

4.1 Fluxograma de Processo e Descrição da UPMP

De forma a atender a finalidade multi-propósito da unidade, o projeto e a construção dos equipamentos, foram executados em conformidade com o fluxograma apresentado na Figura 2, enfatizando-se o dimensionamento dos equipamentos, projeto mecânico, seleção dos instrumentos de medida e a segurança e estabilidade da Unidade Piloto Multi-Propósito (UPMP).

Para melhor entender o fluxograma proposto, divide-se as correntes em um circuito de gás de combustão e um circuito de gás de reciclo e mistura reacional e conforme Figura 2.

O gás (GLP) entra em um queimador que promove a mistura para queima GLP-AR em uma fornalha, onde os gases gerados pela combustão escoam pelo reator através do espaço anular devido a uma depressão, gerada por um exaustor, para promover a tiragem dos gases. Tem-se uma medida de vazão dos gases de combustão por tubo de Pitot e seis tomadas de temperatura desta corrente ao longo do leito reacional.

Pode-se iniciar o entendimento do circuito da mistura reacional a partir do gás de reciclo e adição de nitrogênio. Esta corrente segue e são adicionados os resíduos através de uma rosca dosadora controlada por um variador com inversor de frequência; desta forma tem-se o controle da vazão de alimentação dos resíduos, que são arrastados através do leito reacional aquecido promovendo a reação de pirólise. Segue-se então para o ciclone e em

seguida para o condensador. O condensador forma um circuito fechado com uma torre de resfriamento de água. Após a obtenção dos produtos condensáveis esta corrente segue para um tambor “flash” que promove a separação gás-líquido. A corrente gasosa resultante segue para um soprador com a finalidade de gerar velocidade para o gás de reciclo, passando por mais um tambor “flash” para a retirada de eventuais condensáveis gerados pelo aumento da pressão. Então fraciona-se a corrente de gases não-condensáveis, onde uma fração é o gás de reciclo e outra segue para o tratamento de gases.

Convém salientar que os sistemas de tratamento de gases e de água da unidade não serão objeto de estudo desta dissertação.

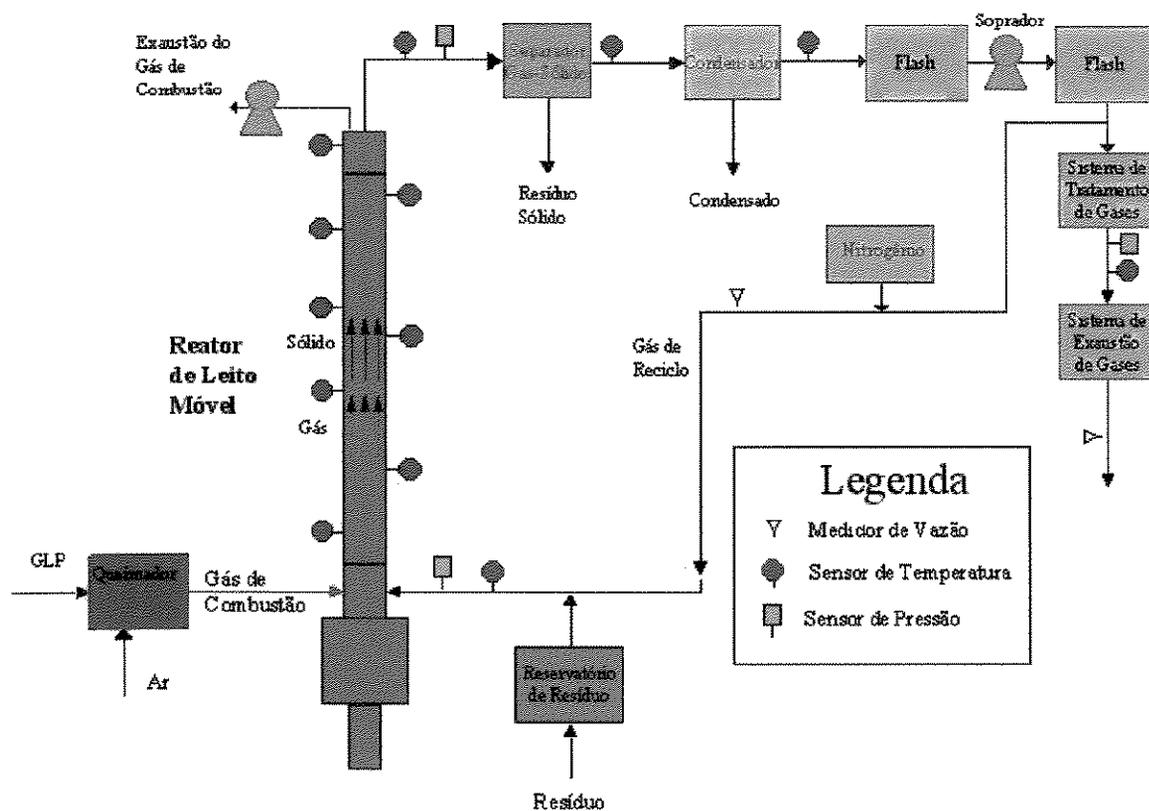


Figura 3. Fluxograma do processo da UPMP.

4.2 Simulação para Projeto

O aparato experimental foi projetado e montado nas dependências do Departamento de Engenharia Química da Universidade Regional de Blumenau, a partir da solução do modelo térmico, considerando-se a entrada dos gases de combustão a 900°C e a mistura reacional a 100°C, para uma estrutura modular de reatores em série.

As propriedades físicas e parâmetros referentes à combustão de GLP foram obtidos com o software CGComb 1.0 da C.Greco Térmica e Fluidos Consultoria Ltda. Para fins de projeto uma corrente de nitrogênio foi considerada como corrente de reciclo.

A Figura 4 apresenta os resultados da combustão de GLP, como volume dos produtos, composição, temperatura de saída dos gases de combustão e outros dados utilizados na modelagem.

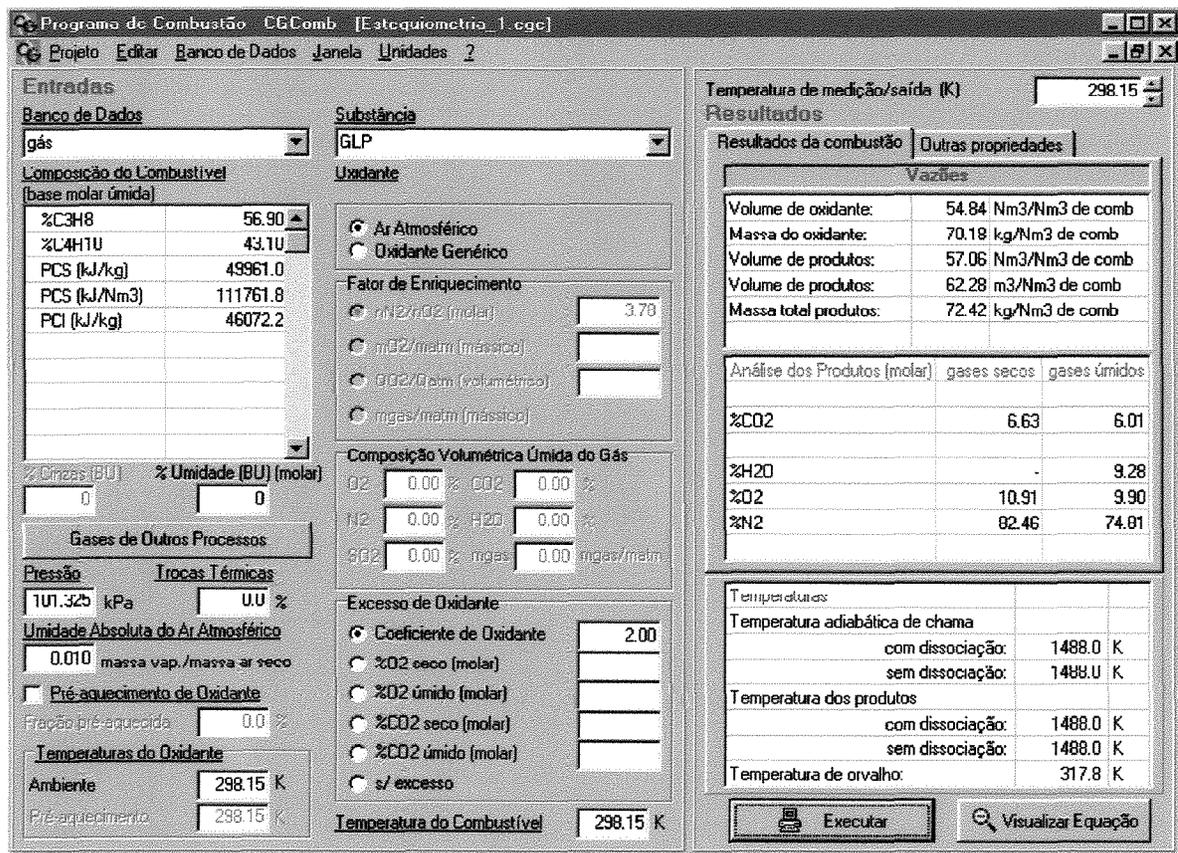


Figura 4. Vista dos resultados da combustão de GLP utilizando o software CGComb 1.0

A Figura 5 mostra as propriedades físicas (capacidade calorífica e massa específica) do combustível e dos produtos obtidos com o software em relação à queima de GLP.

Convém salientar que o resíduo usado nas simulações foi o resíduo sintético denominado poliestireno cujas propriedades físicas se encontram na Tabela 3.

Deve ser destacado que com o modelo desenvolvido e os dados oriundos do software desenvolveu-se um programa computacional em linguagem Fortran, para simular a operação de um reator pirolítico que permitiu conhecer os perfis de temperatura do reator.

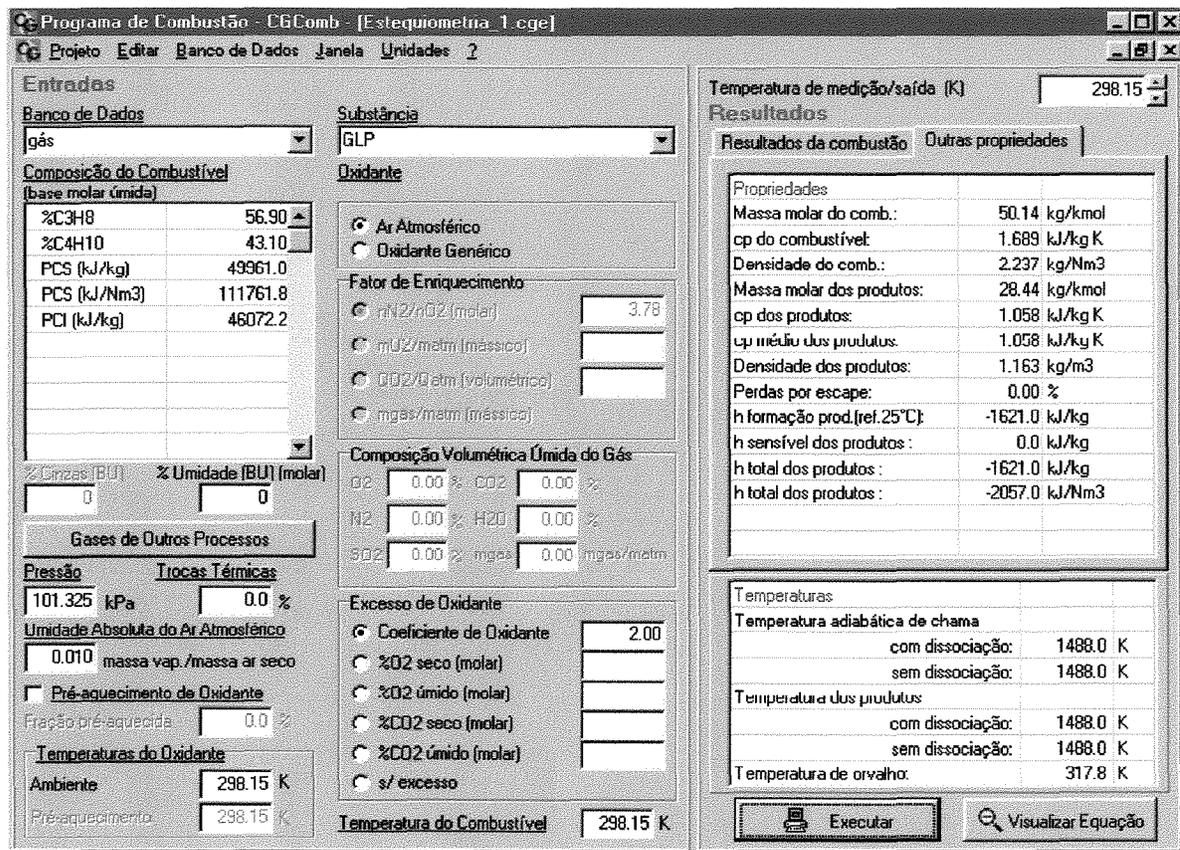


Figura 5. Vista das propriedades físicas da queima de GLP utilizando o software CGComb

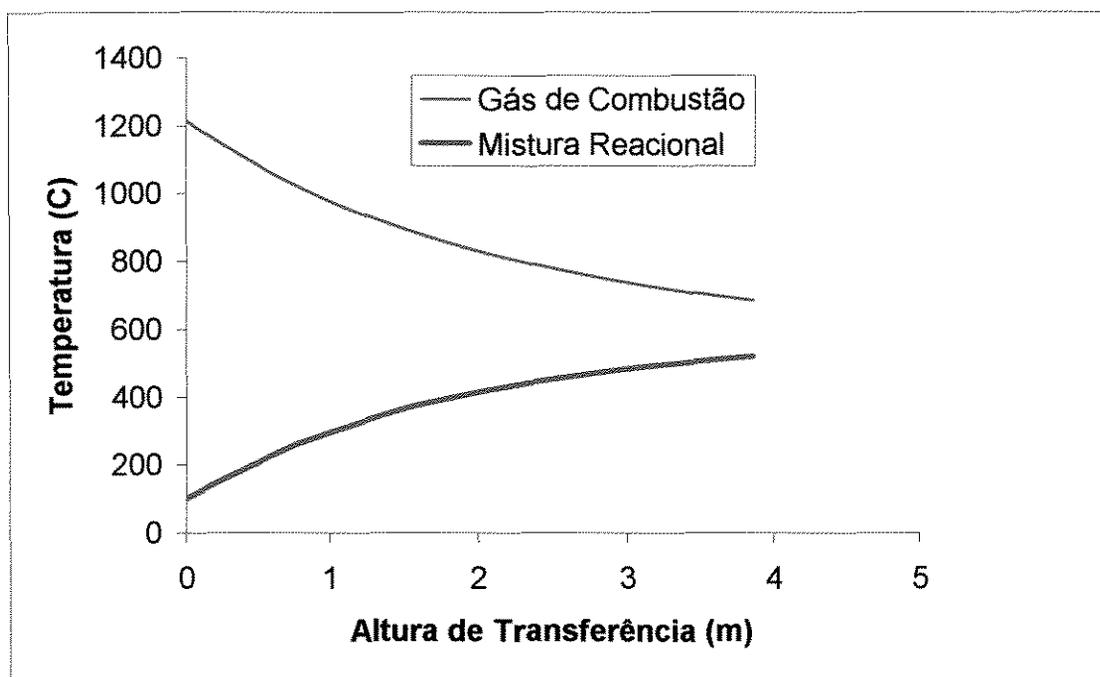
Tabela 3. Propriedades físicas do poliestireno

Massa específica	1,07 g/cm ³
Diâmetro de partícula	4mm
Diâmetro de partícula	2mm
Diâmetro de partícula	1mm

Apresenta-se a seguir os resultados das simulações com modelo térmico com a finalidade de projeto da unidade.

Utilizando a capacidade mínima de queima do queimador (80000 kcal/h) e considerando-se que a entrada dos gases de combustão à temperatura fornecida pelo software (1200°C) tem-se os seguintes perfis de troca térmica apresentados na Figura 6.

Pode-se identificar que a temperatura da mistura reacional em uma altura de transferência de aproximadamente 4 metros atinge valores próximos a 500°C, garantindo-se condição de pirólise para uma grande variedade de resíduos sólidos, como plásticos, biomassa, etc.

Figura 6. Perfil de temperatura da UPMP com 80000 kcal/h, 1200°C e $d_p=4\text{mm}$.

Na Figura 7 apresenta-se os perfis de troca térmica da unidade utilizando a capacidade máxima de queima do queimador (180000kcal/h).

Nota-se que a temperatura atingida pela mistura reacional é de aproximadamente 650°C. Foram realizadas simulações considerando perdas da temperatura dos produtos da Combustão de GLP, o que diminui a temperatura de entrada dos gases. A Figura 8 apresenta o perfil de troca térmica utilizando a capacidade mínima de queima (80000kcal/h) e a entrada dos gases a 900°C, como forma de incluir perdas na fornalha e tubulações.

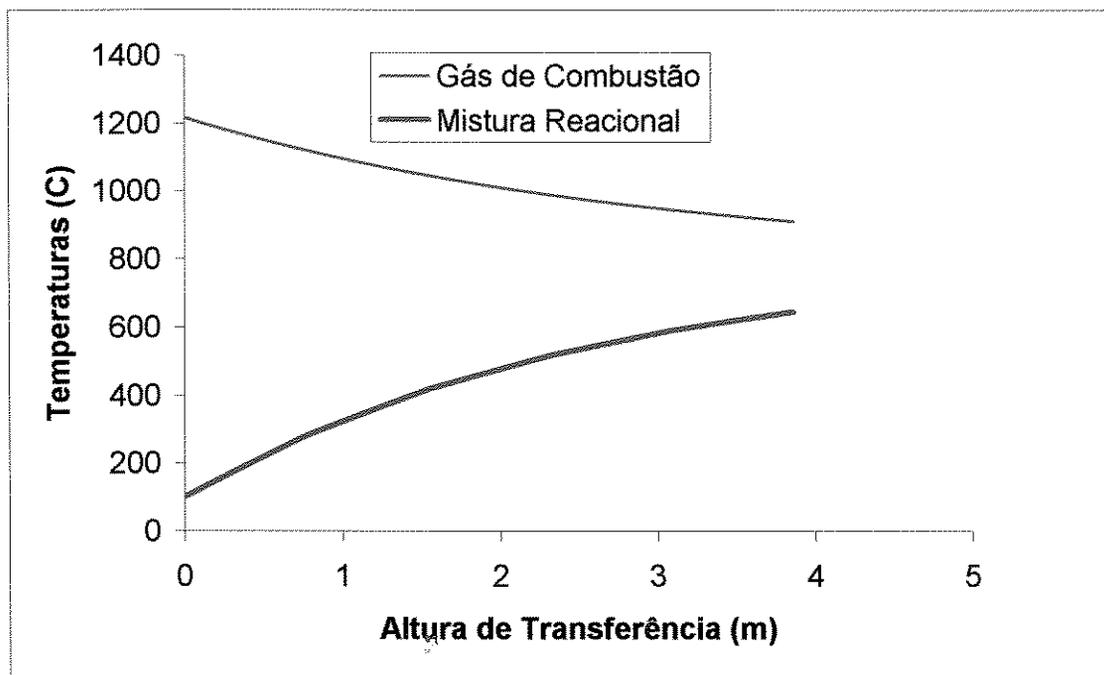


Figura 7. Perfil de temperatura da UPMP com 180000 kcal/h, 1200°C e $d_p=4$ mm.

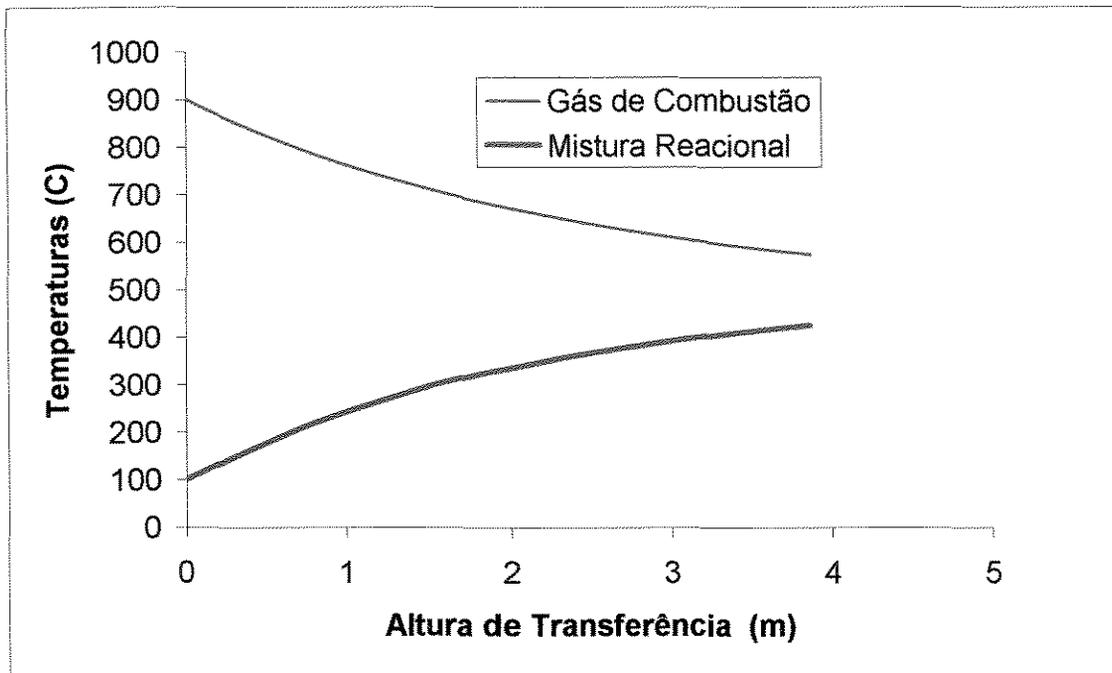


Figura 8. Perfil de temperatura de UPMP com 80000 kcal/h, 900°C e $d_p=4\text{mm}$.

Nota-se que a temperatura da mistura reacional fica na casa dos 400 °C, garantindo-se pirólise de uma gama de resíduos sólidos.

Na Figura 9 mostra-se os perfis com a mesma condição de entrada dos gases mas, com a capacidade máxima do queimador (180000 kcal/h). Repara-se que a temperatura da mistura reacional atinge valores mais elevados, em torno de 550°C, devido a uma maior fornecimento de energia.

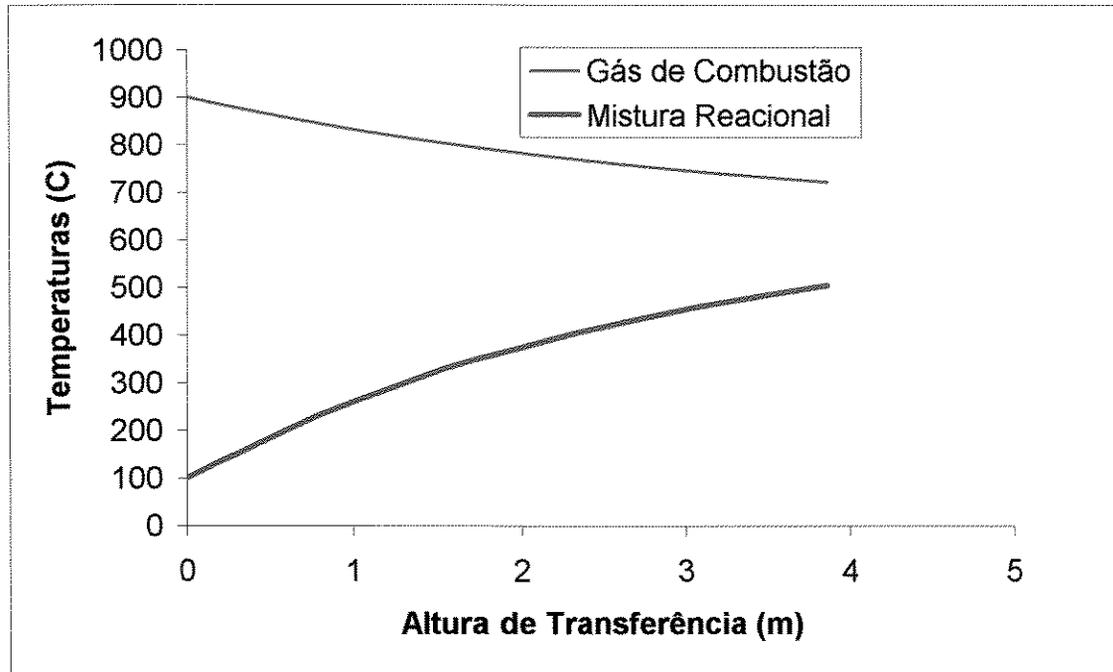


Figura 9. Perfil de temperatura da UPMP com 180000 kcal/h, 900°C e $d_p=4\text{mm}$.

As simulações anteriores foram consideradas utilizando o diâmetro de partícula dos resíduos com o valor de 4mm.

Apresenta-se na Figura 10 os perfis de troca térmica utilizando o diâmetro de partícula de 2 mm e entrada dos gases a 900°C e com capacidade mínima de queima do queimador (80000 kcal/h).

Nota-se que a temperatura atingiu valores próximos a 500°C. Os perfis de temperatura apresentados na Figura 11, referem-se as mesmas condições de entrada e queima com exceção do diâmetro de partícula, agora com 1mm.

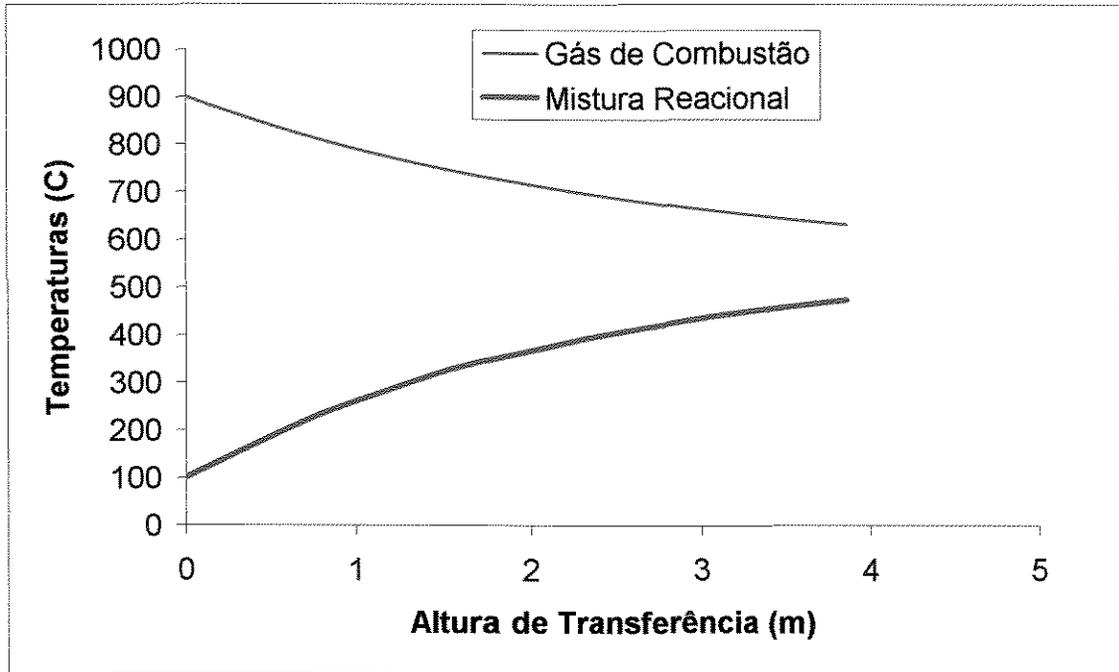


Figura 10. Perfil de temperatura da UPMP com 80000kcal/h, 900°C e $d_p=2$ mm.

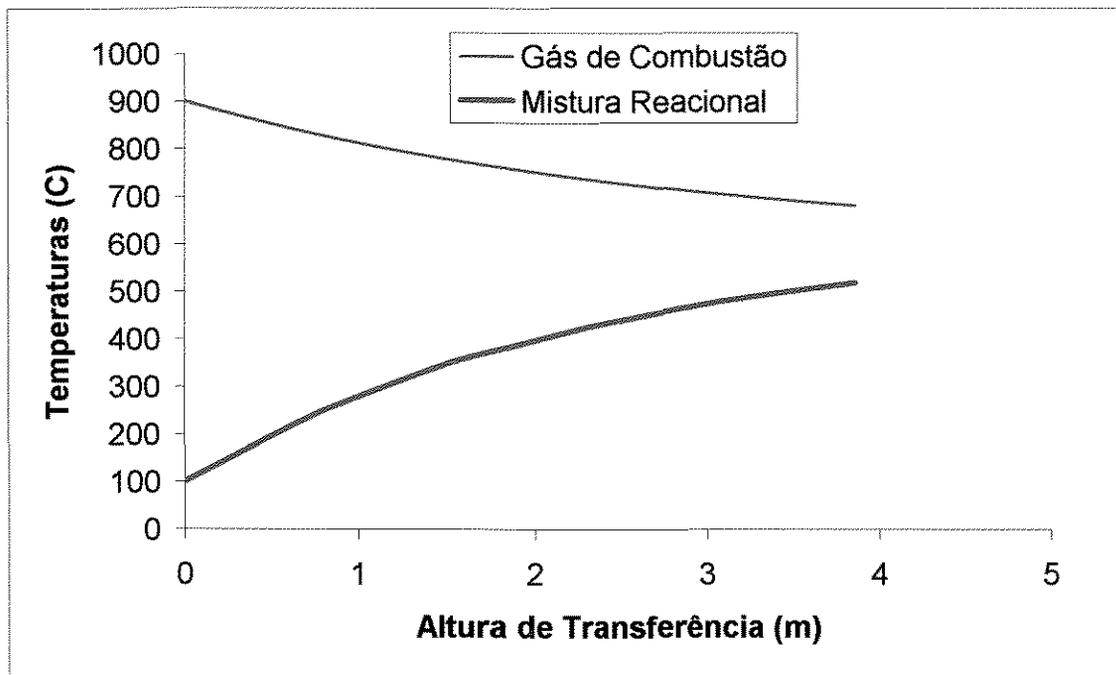


Figura 11. Perfil de temperatura da UPMP com 80000 kcal/h, 900°C e $d_p=1$ mm.

Repare-se que a temperatura atingida para a mistura reacional na saída do sistema supera 500°C, suficiente para a pirólise de uma grande variedade de resíduos. Percebe-se também que o menor diâmetro de partícula tem grande influência sobre o perfil de troca térmica da unidade.

As Tabelas 4 e 5 resumizam as condições simuladas e os principais resultados das simulações para projeto, respectivamente.

Tabela 4. Principais condições simuladas.

Condição	Capacidade do Queimador (kcal/h)	Temperatura de Entrada do Gás de Combustão (°C)	Diâmetro das Partículas (mm)
1	80000	1215	4
2	180000	1215	4
3	80000	900	4
4	180000	900	4
5	80000	900	2
6	80000	900	1

Tabela 5. Principais resultados simulados.

Condição	Gás de Combustão		Mistura Reacional	
	Temperatura de Entrada (°C)	Temperatura de Saída (°C)	Temperatura de Entrada (°C)	Temperatura de Saída (°C)
1	1215	684.8654	100	519.8388
2	1215	909.6614	100	644.0038
3	900	574.7879	100	425.5706
4	900	722.2849	100	504.0239
5	900	631.6356	100	473.1277
6	900	681.2241	100	518.8524

4.3 Projeto da UPMP

Baseado nos perfis de temperatura obtidos optou-se trabalhar com cinco módulos reacionais conectados em série, que são aquecidos em uma carcaça aletada do tipo duplo tubo, pelo escoamento anular de gases resultantes da combustão de GLP em uma fornalha. Na Figura 12 pode-se visualizar o projeto e construção dos módulos reacionais com uma seção transversal do reator encamisado.

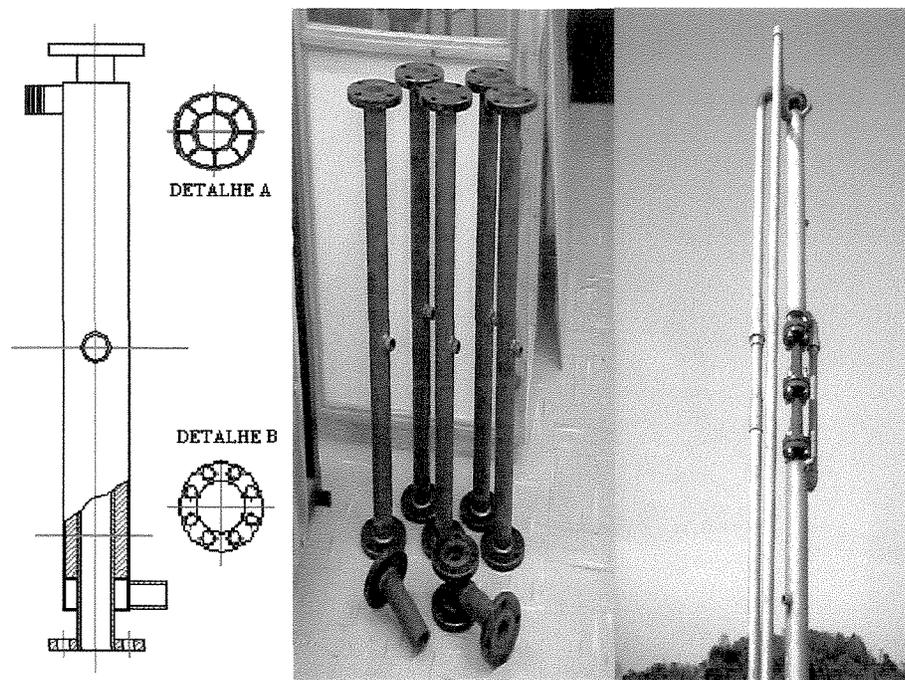


Figura 12. Projeto e vista dos módulos reacionais.

A transferência de calor difere ao longo do leito do reator, pois optou-se por uma configuração diferente para os módulos reacionais no interior da carcaça, o que resulta em um perfil de temperatura distinto para cada módulo. A configuração difere no número de aletas na carcaça, onde dois módulos possuem oito aletas, um dez e outros dois módulos com dezesseis aletas longitudinais. Os detalhes (A) e (B) da Figura 12 apresentam a seção transversal das aletas longitudinais e a seção da placa distribuidora dos gases, respectivamente.

Para a vedação das flanges dos módulos reacionais e de outras conexões da planta, tendo em vista as altas temperaturas, foram utilizadas juntas metálicas em bronze, para se evitar qualquer tipo de vazamento oriundo da modificação das propriedades físicas do gás.

O queimador instalado para a geração dos gases, é o modelo TGC-10 da TECNOTHERM Ltda. (Figura 13) e possui uma capacidade de queima de 80000 a 180000 kcal/h possibilitando versatilidade térmica ao sistema. O combustível utilizado para a geração dos gases é GLP (3 cilindros P-45 ligados em paralelo). Para o funcionamento do queimador se faz necessária a instalação de uma válvula reguladora de pressão, seguida de uma válvula redutora de pressão para evitar problemas de pressão no sistema e distúrbios operacionais por congelamento do GLP.

O queimador admite ar com um soprador primário a uma pressão de 4 mBar. Como a perda de carga no sistema é superior a pressão fornecida pelo soprador, um exaustor para geração de depressão no sistema de aquecimento se faz necessário. Vale salientar que no modelo térmico utilizado para projeto utilizou-se à capacidade mínima do queimador. A temperatura desejada está compreendida entre 300 e 600° C, dependendo das características do material a ser pirolisado.



Figura 13. Vista do queimador.

A alimentação dos resíduos particulados é realizada com uma rosca dosadora para dentro da câmara, construída de acordo com a Figura 14 cuja foto pode ser vista na Figura 15, em uma atmosfera de nitrogênio; essa alimentação é controlada por um variador com inversor de frequência, o que permite o controle da taxa de alimentação do resíduo. Vale salientar que o potenciômetro do variador de frequência possui aumento linear da frequência.

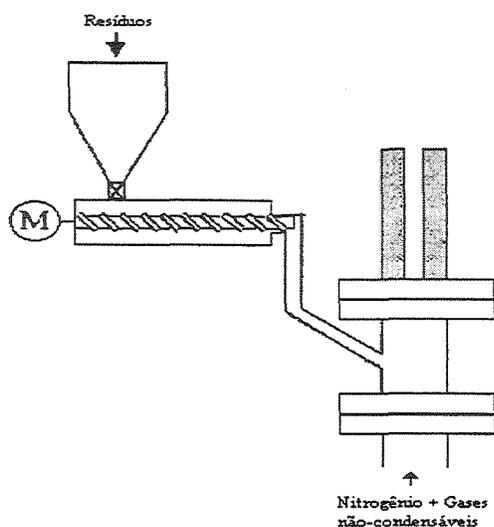


Figura 14. Vista do esquema do sistema de alimentação de resíduo.

O produto resultante da reação de pirólise ao sair do último módulo reacional passa por processos de separação gás-sólido, condensação e separação gás-líquido, sendo que uma fração do gás não condensável é utilizada como agente de arraste para o transporte vertical das partículas.

A mistura resultante ao sair do reator segue por uma tubulação conectada ao ciclone, cujo projeto e vista podem ser observados na Figura 16, 17, cuja finalidade é de retirar o pó proveniente da reação e eventuais particulados que tenham sido arrastados durante o transporte pneumático.

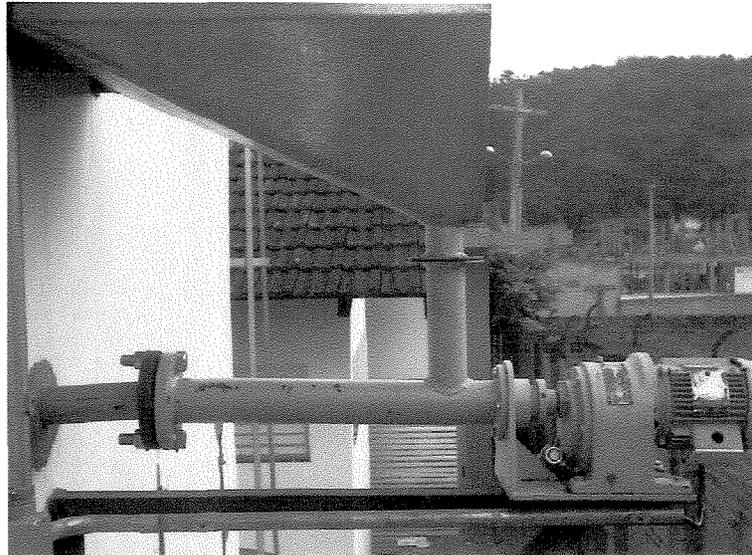


Figura 15. Vista do sistema de alimentação do resíduo.

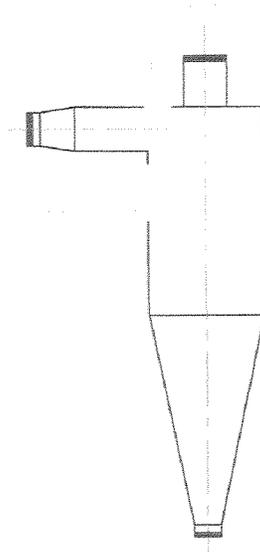


Figura 16. Projeto do ciclone.

Após o ciclone, a mistura escoar até um condensador casco tubo, com dois passes na carcaça; a troca térmica se dá com água que é continuamente resfriada em uma torre de

resfriamento. O condensador e a torre de resfriamento formam um circuito fechado, com exceção da adição de água, para suprir a evaporação da mesma (Figuras 18 e 19).



Figura 17. Vista do Ciclone.

Como pode-se observar, a torre de resfriamento (Figura 19) é disposta no alto da instalação predial, de modo a receber maior convecção natural e melhorar o seu desempenho, enquanto que o condensador (Figura 18) é disposto no interior do prédio para uma melhor disposição das tubulações.

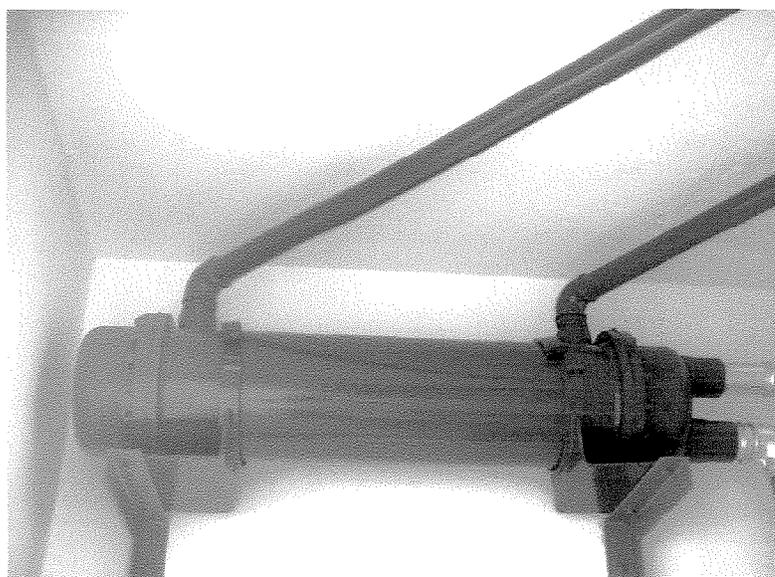


Figura 18. Vista do condensador.

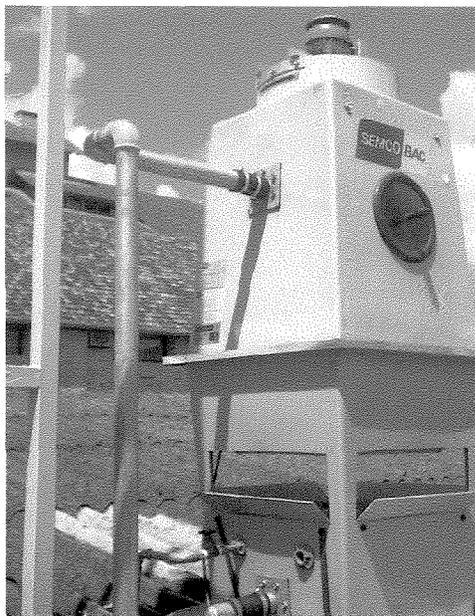


Figura 19. Vista da Torre de resfriamento.

Com a retirada do calor de condensação da mistura, a mistura gás-líquido segue para um primeiro tambor “flash”, onde é separada a fase líquida da fase gasosa. O projeto e a imagem fotográfica dos tambores “flash” podem ser vistos nas Figuras 20 e 21.

Os óleos e mistura de produtos condensáveis ficam armazenados no tambor, que contém purga periódica. Devido à perda de carga sofrida, e a necessidade de uma fração dos gases não condensáveis para o transporte dos particulados ao longo do leito, os gases passam por um soprador multi-estágio, e por um segundo tambor “flash” garantindo a separação dos prováveis produtos condensados pelo aumento da pressão.

O estágio final do processo, antes do início do ciclo, é o fracionamento da corrente gasosa, onde parte destes gases são desviados para uma unidade de tratamento, e outra fração é usada como gás de reciclo.

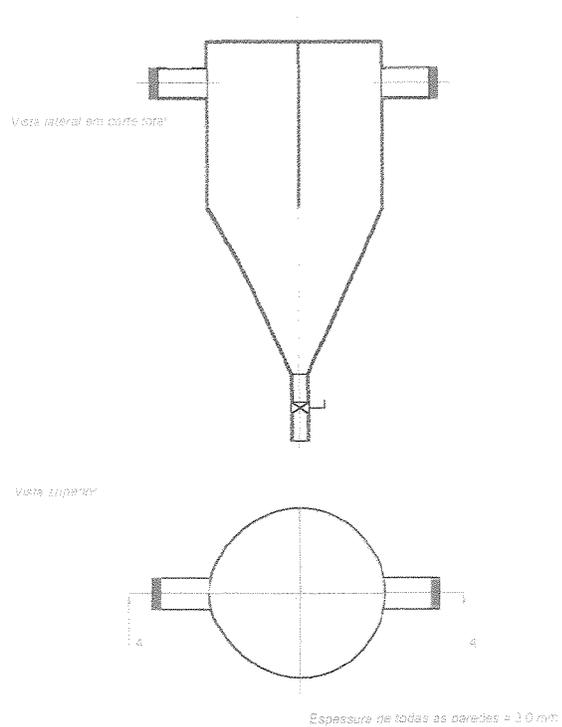


Figura 20. Projeto dos tambores “flash”.

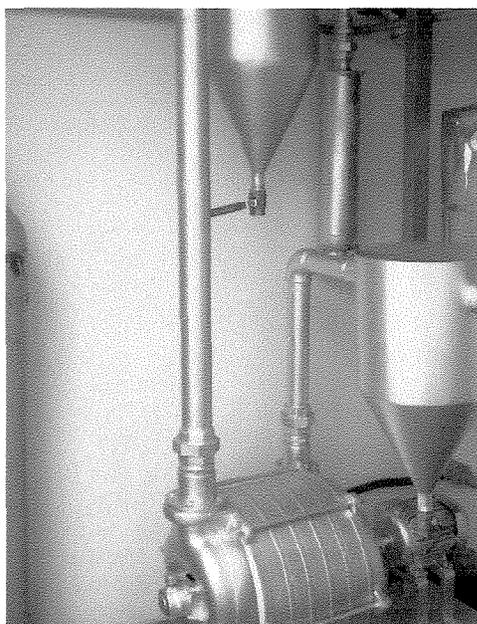


Figura 21. Vista dos tambores “flash”.

Um lavador de gases foi construído de forma a tratar os gases gerados pela reação de pirólise dos resíduos, e pretende-se a implantação de uma unidade de tratamento de água análoga ao lavador, para que a água possa ser tratada e reaproveitada.

Como dito anteriormente a reação de pirólise ocorre em atmosfera controlada, ou seja livre da presença de oxigênio, o que condiciona o uso do nitrogênio, cujo sistema de adição deste gás está ilustrado na Figura 22.

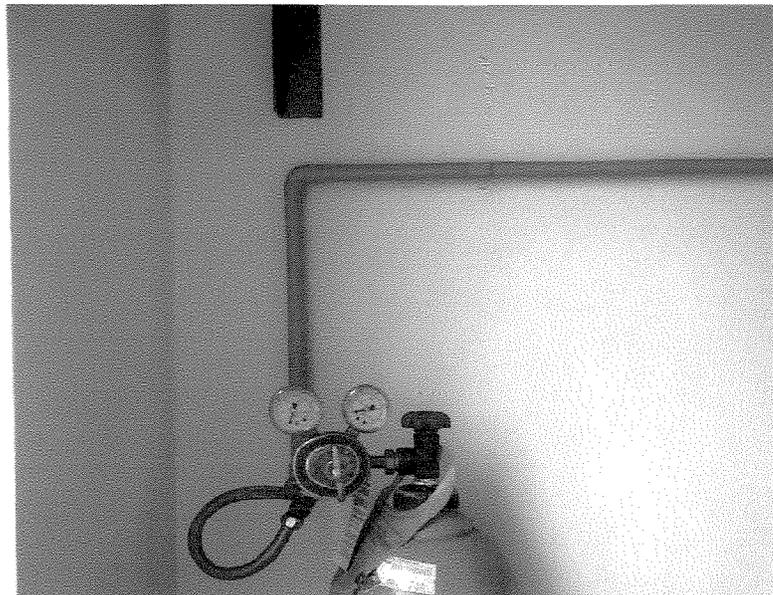


Figura 22. Sistema de adição de nitrogênio.

4.4 Sistema de Aquisição de Dados e Procedimentos de Calibração

4.4.1 Sistema de Aquisição de Dados e Calibração

A unidade foi construída e montada de acordo com o fluxograma, porém com a metodologia proposta é necessária a implantação de um sistema de aquisição de dados operacionais, como vazão, pressão e temperatura e a elaboração de um procedimento de “start-up” da unidade.

A Figura 23 ilustra a vista frontal inferior da unidade piloto multi-propósito com ampliação da imagem para melhor identificar o aparato experimental.

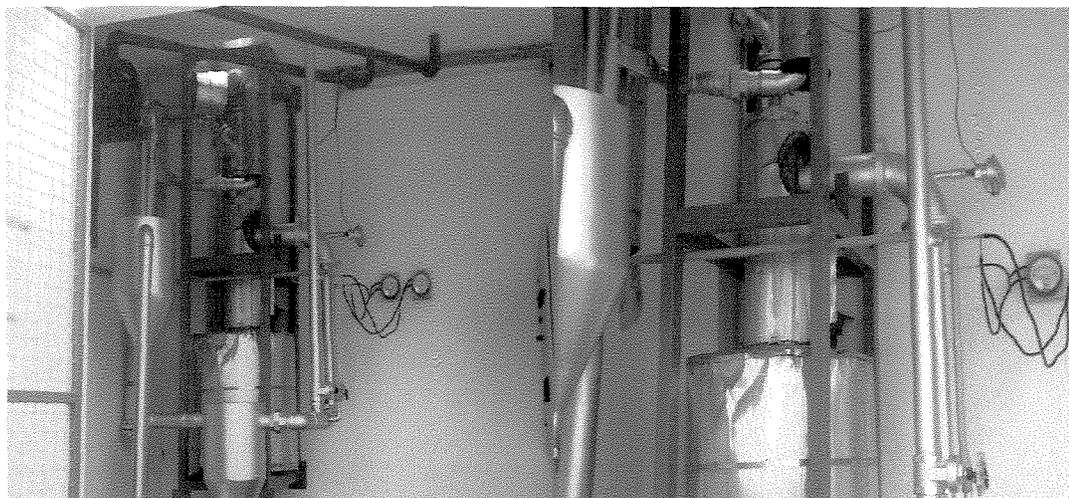


Figura 23. Vista frontal inferior da UPMP.

4.4.2 Sistema de Alimentação

Antes da partida da unidade foram realizados testes com o sistema de alimentação, a fim de verificar a curva de alimentação. Variou-se o potenciômetro do variador de frequência em 3 faixas de frequência, sendo que foram coletados dados 3 vezes de 5 minutos para cada frequência. Os resíduos foram alimentados para dentro do reator, tendo como velocidade de reciclo um valor acima da sua velocidade terminal. Salienta-se que o potenciômetro possui aumento linear da frequência, o que pode-se ser comprovado pelos dados experimentais apresentados na Figura 24.

Os resíduos alimentados foram todos coletados no ciclone, o que mostrou que o separador gás-sólido possui uma alta eficiência.

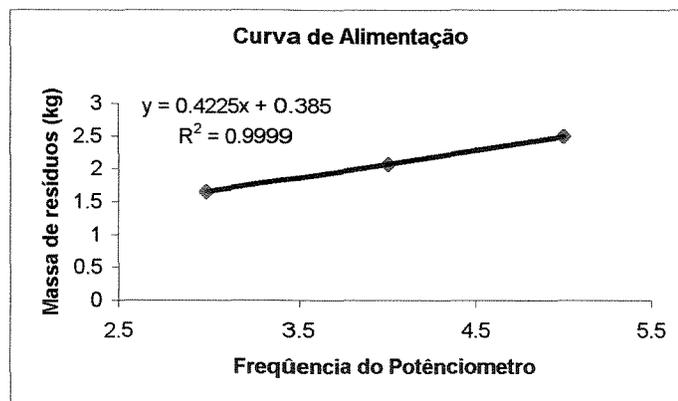


Figura 24. Curva de Alimentação da Rosca Alimentadora.

4.4.3 Medidas de Vazão

Para conhecer a vazão de gás de combustão, a vazão do gás de reciclo e a quantidade de gás não condensável foram utilizados tubos de “Pitot”, para obtenção da velocidade de escoamento no interior dos dutos. Com as velocidades empregadas e dimensões da tubulação calculou-se o fluxo de escoamento no interior dos equipamentos, utilizando-se o conceito de velocidade média descrito por Bird, (2001) conforme equação:

$$\frac{\bar{v}_z}{v_{z,max}} \approx \left(1 - \frac{r_t}{R_t}\right)^{\frac{1}{7}} \quad (36)$$

e

$$\bar{v}_z \approx \frac{4}{5} v_{z,max} \quad (37)$$

sendo que $v_{z,max}$ é a velocidade máxima obtida experimentalmente.

A velocidade mínima necessária para o arraste pneumático das partículas e a geração do leito fluidizado é calculada através da equação (10).

Uma adaptação realizada no tubo de “Pitot” permitiu variar a sua posição radial, Figura 25. A Figura 26 mostra o perfil de velocidade experimental que reflete na característica turbulenta de escoamento.

A Tabela 6 identifica as médias de 3 leituras do perfil de velocidade obtido na tubulação.

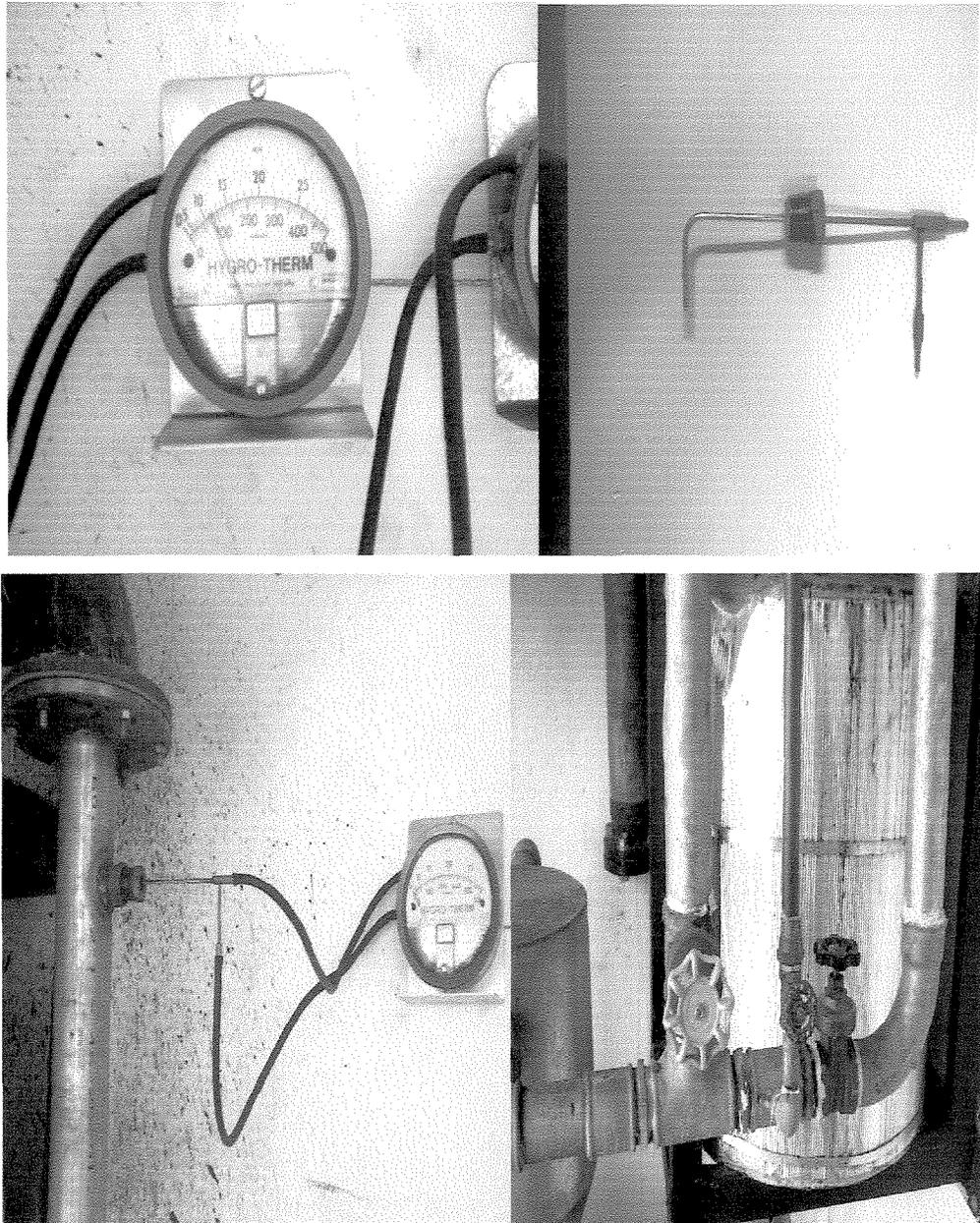


Figura 25. Vista do Tubo de Pitot, manômetro e válvulas de controle de vazão.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Tabela 6. Dados de Velocidade

Distância (cm)	Velocidade (m/s)
0.000	0.000
0.300	10.000
0.625	11.000
1.125	11.700
2.625	12.000
4.125	11.700
4.625	11.000
4.950	10.000
5.250	0.000

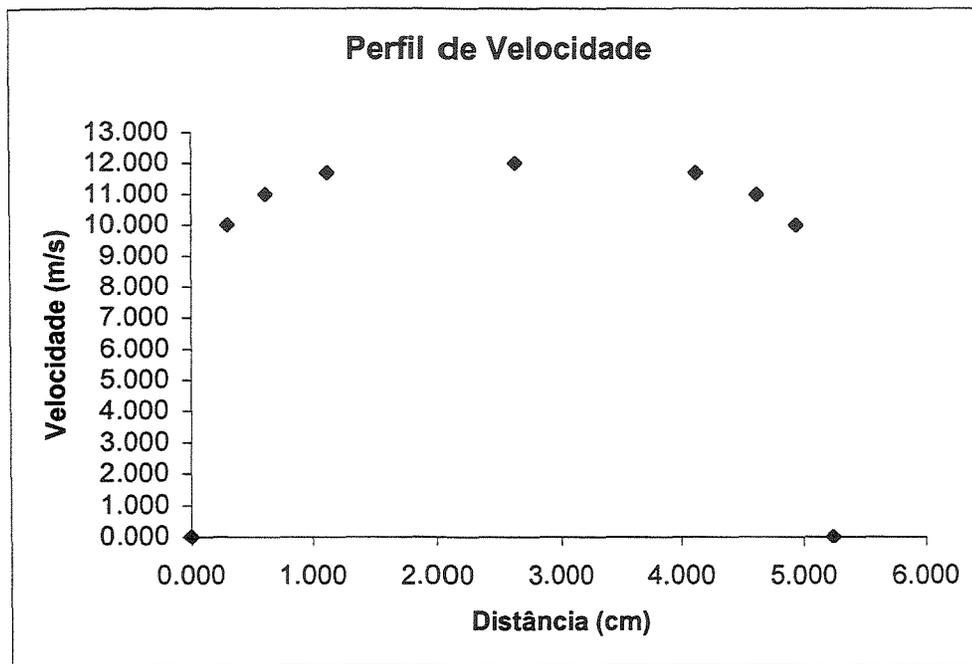


Figura 26. Perfil de velocidade obtido experimentalmente.

4.4.4 Medidas de Temperatura

As medidas de temperaturas, para a obtenção do perfil de temperatura de acordo com a metodologia proposta são treze. O sistema de aquisição de temperaturas foi montado com termopares do tipo “k” ligados por cabos de compensação do tipo “k” a indicadores de temperatura IDTS –210 com capacidade de 10 entradas analógicas.

Tanto os termopares, cabos de compensação e os indicadores foram fabricados pela empresa SAMRELLO Instrumentação Industrial Ltda. A faixa de medida dos termopares é de 0-1200 °C. Dos treze termopares, sete são usados para medida da mistura reacional e seis para o gás de combustão, e cada conjunto utiliza um indicador de temperatura (Figura 27).

Ressaltamos que os termopares foram dispostos de forma a estabelecerem contato direto com as correntes para a leitura das temperaturas.

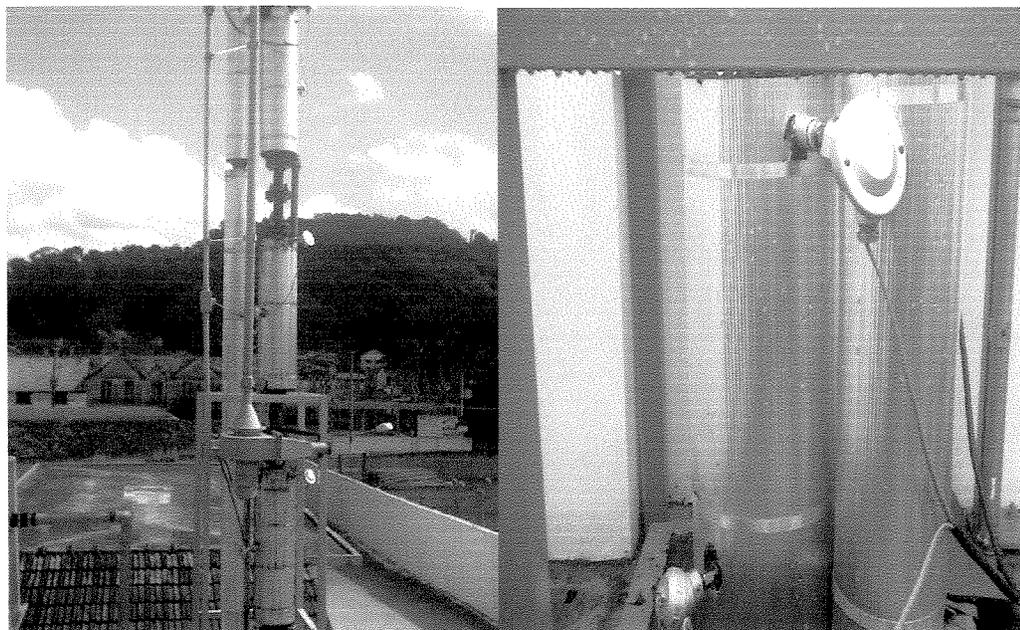


Figura 27. Vista dos Termopares e indicadores de temperatura.

A Figura 29 mostra as posições de aquisição das temperaturas, pressão e medidas de vazão, ao longo do leito reacional.

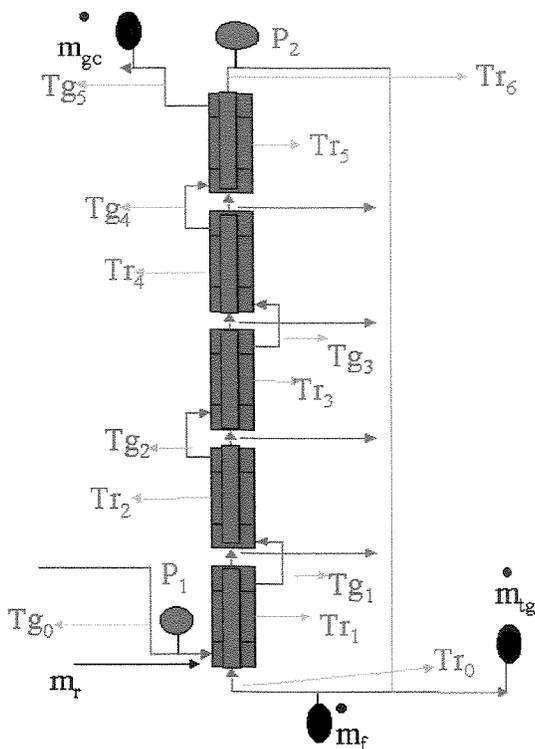


Figura 29. Esquema de aquisição de dados.

Para o gás de combustão as medidas de temperatura foram dispostas ao longo dos reatores de acordo com a Figura 29, tendo termopares na entrada e saída dos gases no primeiro reator, e a partir deste, uma medida na saída dos demais módulos. Para a mistura reacional, a medida na corrente fracionada para o reciclo do sistema, é dada abaixo da linha de entrada dos gases de combustão; a partir desta são feitas na metade de cada módulo reacional e na saída. Com este critério obtém-se as medidas na entrada e saída ao longo da mistura reacional.

4.4.5 Medidas de Pressão

Dois transmissores de pressão foram utilizados para tomada de pressão do gás de combustão na entrada do reator, e uma medida de pressão da mistura reacional na saída do

reator. Pretende-se ainda instalar mano-vacúômetros (faixa de medida de -1 a 1 Bar) antes e depois do soprador, e a instalação de um vacúometro na fornalha, para a medida da depressão na câmara. Pode-se observar os transmissores de pressão na Figura 30.

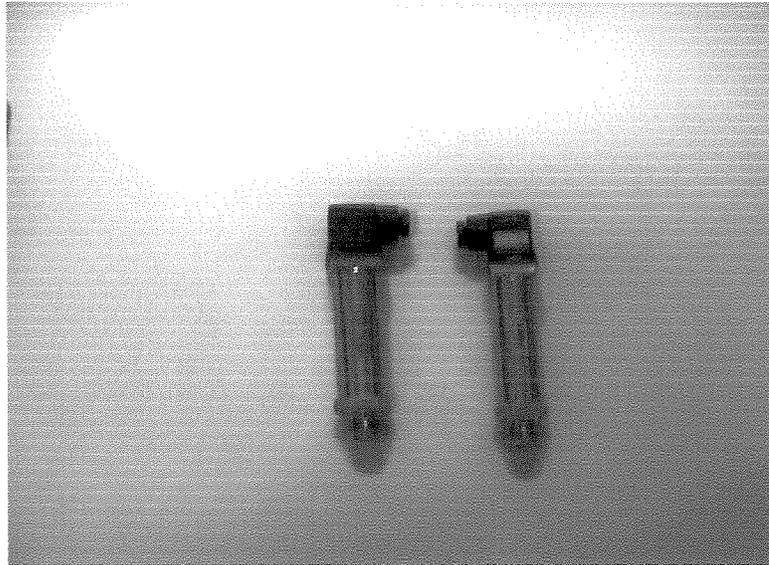


Figura 30. Vista dos Transmissores de Pressão

4.5 “Start-Up” da Unidade

O painel elétrico (Figura 31) anexo à unidade permite o fácil acionamento dos motores e tomadas das medidas de temperatura.

Os motores elétricos que acionam a bomba de água, o exaustor para a torre de resfriamento, a rosca alimentadora, o exaustor para a tiragem dos gases de combustão e um soprador para a geração do reciclo, permitem, no seu conjunto, o funcionamento eficiente da unidade. Contudo, o queimador é acionado no painel e possui um sistema de alarme, para evitar registro de acidentes.

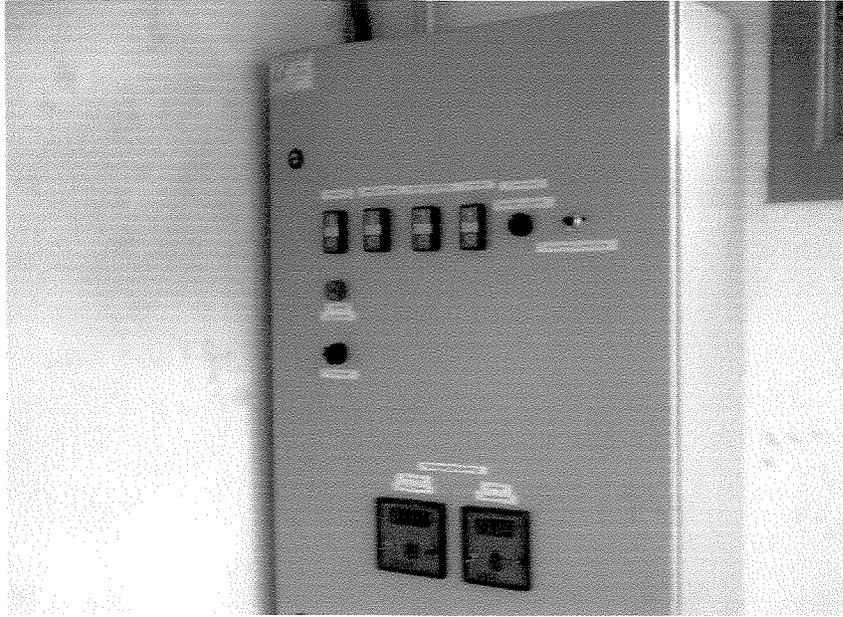


Figura 31. Vista do painel elétrico

Para ligar o queimador e iniciar o aquecimento da unidade é necessário seguir uma série de etapas. Como a inércia térmica do sistema é muito grande, e o aquecimento da unidade demanda elevado tempo e para evitar o desperdício de combustível, deve ser realizado de forma que o queimador fique ligado por um período de tempo até que um dado numa posição alcance a temperatura pré-determinada. Neste momento desliga-se o queimador e aguarda-se a subida das temperaturas e quando começam a decair, liga-se o queimador novamente até o alcance da segunda medida pré-determinada. Este processo repete-se até 200°C e assim sucessivamente. Para a melhoria deste procedimento será acoplado à unidade um controlador lógico programável (CLP).

O aquecimento deverá ser antecedido pela injeção do nitrogênio, para evitar perdas térmicas decorrentes das propriedades físicas características deste gás.

A bomba de água e o exaustor da torre de resfriamento podem ser ligados após o alcance das temperaturas operacionais específicas de cada resíduo, seguida do acionamento para a alimentação do resíduo granulado no processo.

Capítulo 5

5 Resultados e Análises

No Capítulo 5 apresenta-se os principais resultados experimentais e os obtidos com a simulação numérica.

5.1 Experimentação Numérica

Apresenta-se os resultados de experimentação numérica do modelo térmico e a análise de independência em relação a malha e qualidade dos resultados gerados pela solução numérica. Pode-se ver os resultados na Tabela 7.

Tabela 7. Resultados obtidos com temperatura de entrada a 900°C e $d_p=2\text{mm}$.

Carga Térmica(kcal/h)	Malha	Tg ₁ (L)	Tg ₂ (L)	Tg ₃ (L)	Tg ₄ (L)	Tg ₅ (L)
		Tf ₁ (L)	Tf ₂ (L)	Tf ₃ (L)	Tf ₄ (L)	Tf ₅ (L)
80000	10X 1	809.2	742.4	688.54	655.1	638.8
		232.3	327.3	397.84	439.6	459.9
	100 X 1	811.2	745.68	696.11	659.06	632.29
		231.68	326.9	392.83	439.5	471.9
	1000 X 1	811.32	745.7	696.5	659.5	632.64
		231.61	326.88	392.84	439.54	472.12
130000	10 X1	841.69	796.88	761.27	733.64	721.2
		238.55	343,17	420.5	476.43	502.16
	100 X 1	842.82	798.8	763.79	736.43	715.9
		238.62	343.19	419.7	476.57	517.78
	1000 X 1	841.94	799.1	764.73	736.73	715.42
		328.6	343.22	419.76	476.65	519.38
180000	10 X 1	857.1	823.2	795.79	774.02	764.1
		242.2	351.0	433.0	495.39	524.1
	100 X 1	857.8	824.71	797.7	776.18	759.8
		242.1	351.32	433.3	495.7	541.75
	1000 X 1	857.9	824.9	797.9	776.4	759.37
		242.1	351.37	433.43	495.8	543.57

Percebe-se através dos valores obtidos com as corridas numéricas que as variações são pequenas para a propriedade em questão (temperaturas), sendo que esta precisão não é observada experimentalmente, o que não justifica um refinamento da malha numérica.

5.2 Avaliação Térmica da UPMP

De modo a encontrar a condição ideal de funcionamento da UPMP e identificar o estado estacionário da UPMP, foram construídos os gráficos de perfil de regime permanente. A Figura 33 mostra o perfil de temperatura com entrada do gás de combustão a

900°C e capacidade do queimador a 80000 kcal/h. Vale salientar que as escalas das legendas são de 0-900°C. Ressalta-se que os gráficos representam apenas a variação axial da temperatura, sendo que a variação radial é apenas um ajuste do software.

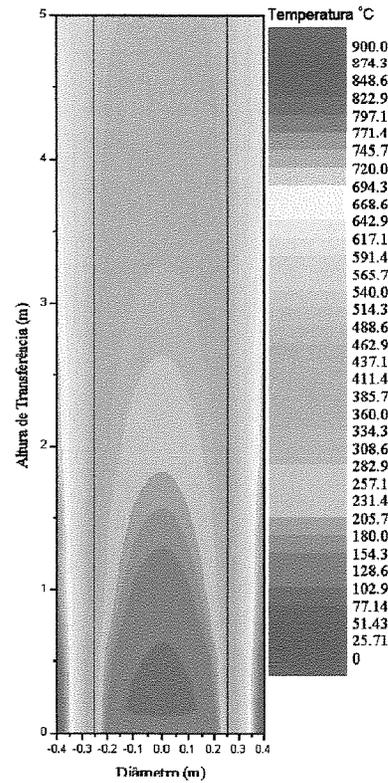


Figura 33. Perfil de temperatura da UPMP com 80000 kcal/h, 900°C e $d_p=4\text{mm}$.

A Figura 34 da vistas ao perfil de temperatura da UPMP com a mesma condição de entrada do gás de combustão, mas com uma capacidade de queima de 130000 kcal/h do queimador instalado.

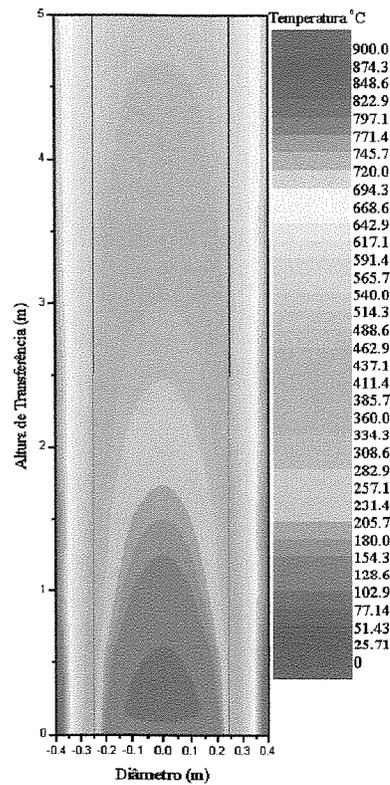


Figura 34. Perfil de temperatura da UPMP com 130000 kcal/h, 900°C e $d_p=4\text{mm}$.

O perfil temperatura da UPMP com capacidade queima de 180000 kcal/h e as mesmas condições de entrada dos perfis anteriores pode ser observado Figura 35.



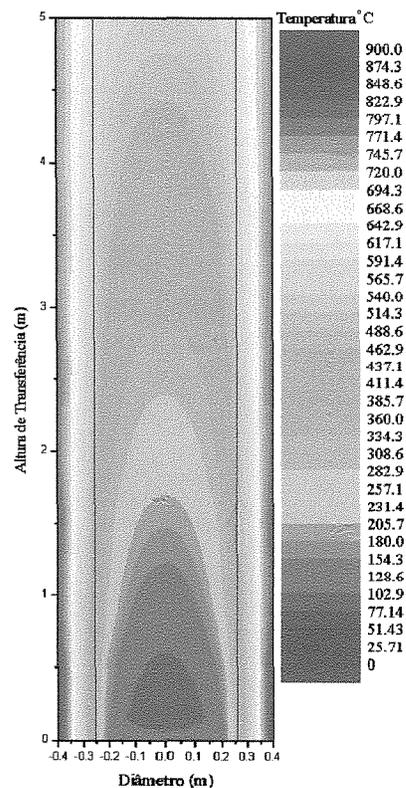


Figura 35. Perfil de temperatura da UPMP com 180000 kcal/h, 900°C e $d_p=4\text{mm}$.

Pode-se concluir da análise das Figuras 33, 34 e 35 que o fator limitante para a transferência de calor não é a capacidade de queima empregada e, sim, a transferência de calor da unidade.

Com base nestas figuras tem-se o referencial para o regime permanente da UPMP, e assim, com as informações fornecidas pelo sistema de aquisição de dados, podemos identificar as condições em que a unidade está operando.

5.3 Comparação de Modelos

Os resultados oriundos das simulações dos modelos macroscópico², microscópico com as propriedades físicas dos gases constantes, e microscópico com as propriedades físicas dos gases variando em função da temperatura são apresentados neste item. Os perfis a seguir seguem as condições de entrada dos gases de combustão a 900°C e do gás de reciclo a 100°C e diâmetro de partícula de 4mm e capacidade de queima de 80000 kcal/h.

Na Figura 36 encontra-se o perfil de temperatura oriundo do modelo macroscópico, constata-se a diminuição da temperatura do gás de combustão enquanto que a temperatura da mistura reacional aumenta ao longo do reator, decorrente da troca térmica entre as duas correntes. O modelo macroscópico foi construído baseado em correlações empíricas, apresenta-se no Anexo as planilhas construídas em Microsoft Excel com este modelo.

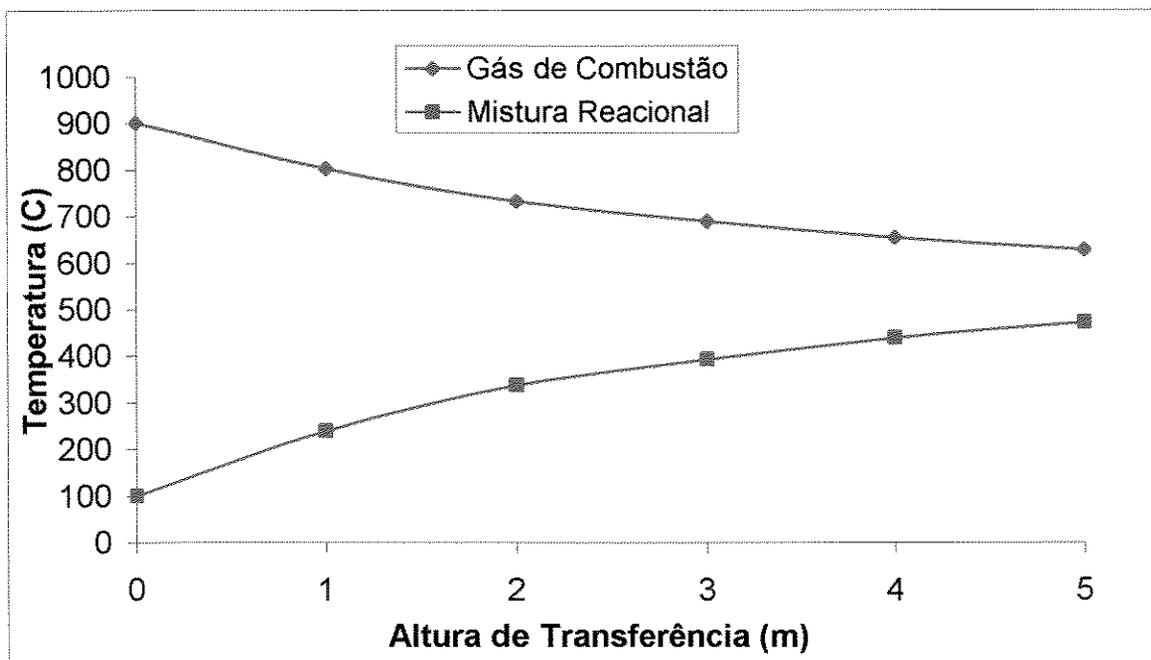


Figura 36. Perfil de temperatura da UPMP com modelo macroscópico.

² O modelo macroscópico é similar ao microscópico apresentado no Cap. 3, no entanto, desconsidera variações axiais ocorrendo nos módulos como se o sistema pudesse ser considerado como estágios.

Na Figura 37. mostra-se o perfil de temperatura da UPMP oriundo do modelo microscópico com propriedades físicas constantes. Nesta análise, nos últimos reatores do topo da unidade, as temperaturas das duas correntes se aproximam com maior intensidade.

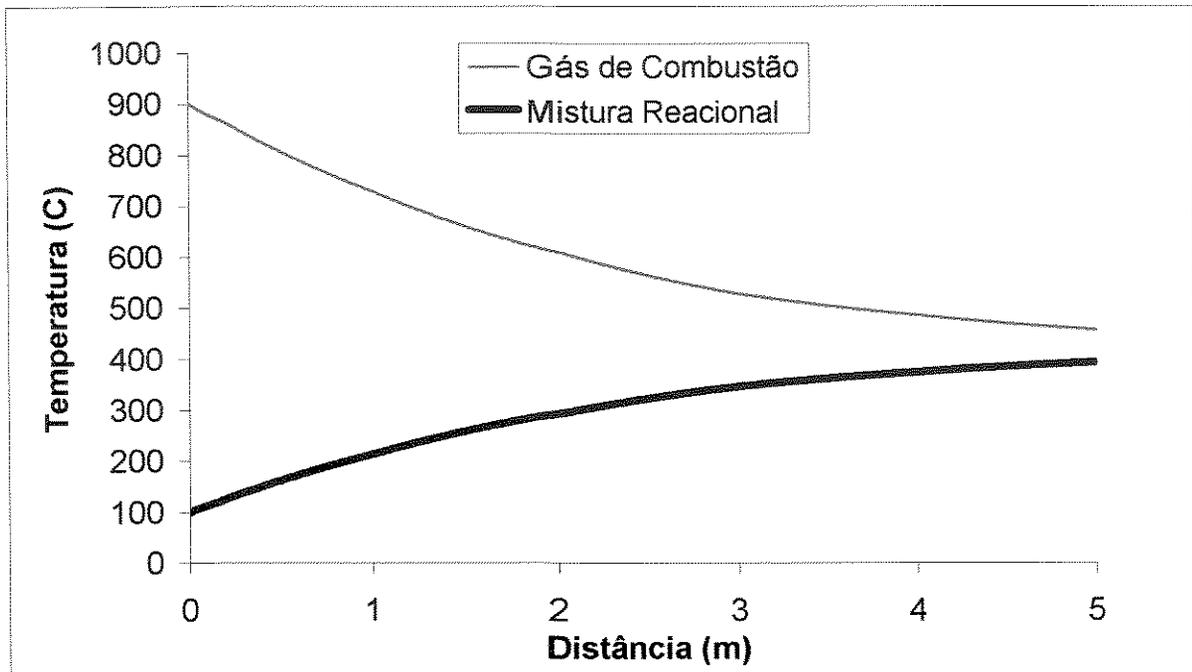


Figura 37. Perfil de temperatura da UPMP com modelo microscópico e propriedades físicas constantes.

Similarmente ao modelo macroscópico, os resultados oriundos do modelo microscópico se assemelham.

Na simulação seguinte considerou-se a dependência das propriedades físicas do gás em função da temperatura. Na Figura 38 pode-se ver o resultado da simulação.

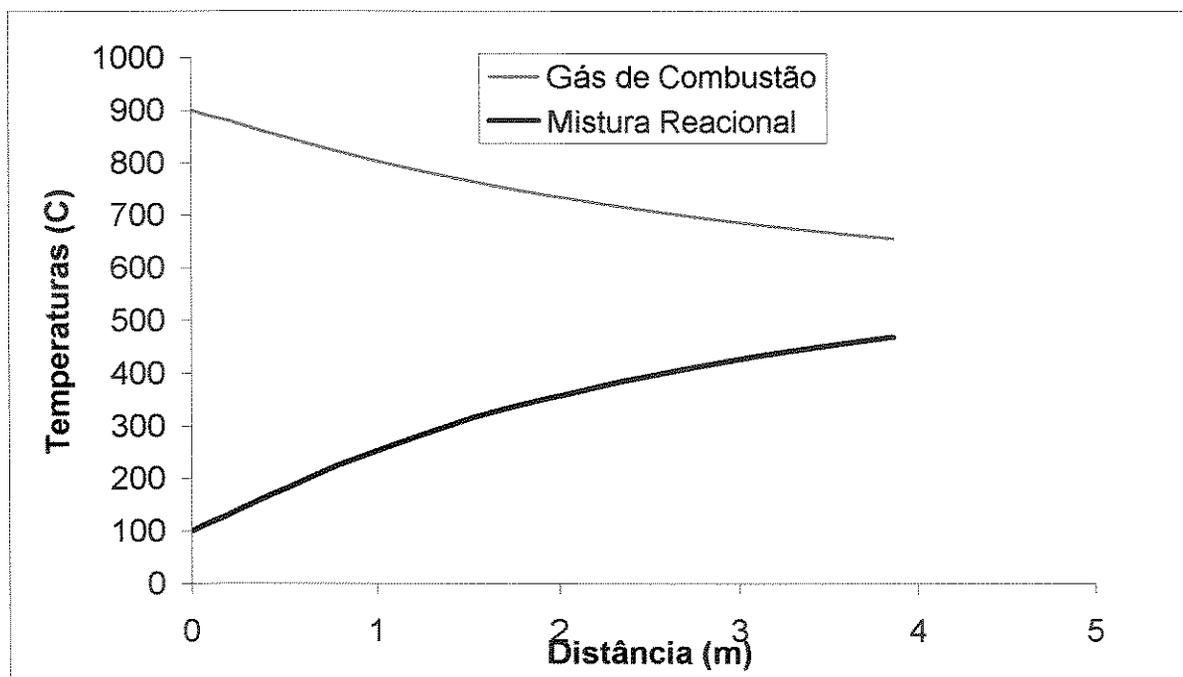


Figura 38. Perfil de Temperatura da UPMP com modelo microscópico e propriedades físicas variáveis.

5.4 Teste de Regressão

Pode-se também mostrar os valores do coeficiente global de transferência de calor obtidos com a simulação do modelo microscópico com propriedades físicas variando em função da temperatura. Estes resultados podem ser vistos na Tabela 9.

Tabela 8. Valores do CGTC para cada módulo reacional

1	27.9717323690229
2	27.9717323690229
3	27.3354017732158
4	27.0049707121236
5	27.0049707121236

Percebe-se que o valor obtido para o coeficiente global de transferência de calor para os dois primeiros módulos e os dois últimos são idênticos, isto ocorre devido a mesma configuração física do módulo.

Como este foi o modelo utilizado para a simulação e projeto da unidade, foram construídos os algoritmos de regressão do coeficiente global de transferência de calor (CGTC). As temperaturas usadas para regressão do CGTC foram as simuladas, e o procedimento de regressão foi o descrito no Problema 1 no Capítulo 3. Pode-se ver na Figura 39 o gráfico de regressão do CGTC.

Verifica-se que o algoritmo de regressão apresentou bons resultados de convergência, sendo que o mínimo da função ficou em torno de 3,25.

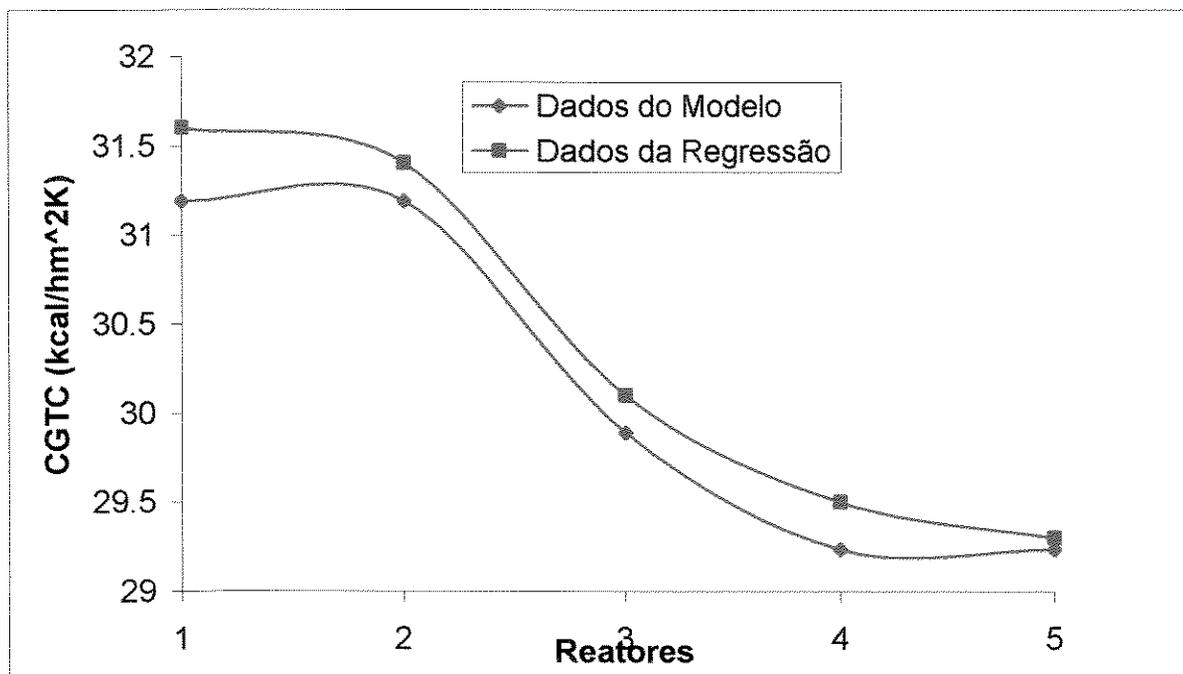


Figura 39. Regressão numérica do Coeficiente Global de Transferência de Calor

5.5 Partida da Unidade (“start-up”)

Realizou-se também a partida da unidade de modo a adquirir experiência e conhecer um pouco o processo de aquecimento da unidade. Apresentamos os perfis de temperatura obtidos com o “start-up” da unidade. Lembra-se ainda que a modelagem

proposta leva em conta o regime permanente, não representando o período transiente do processo.

A Figura 40 apresenta o primeiro perfil do estado transiente de aquecimento da unidade.

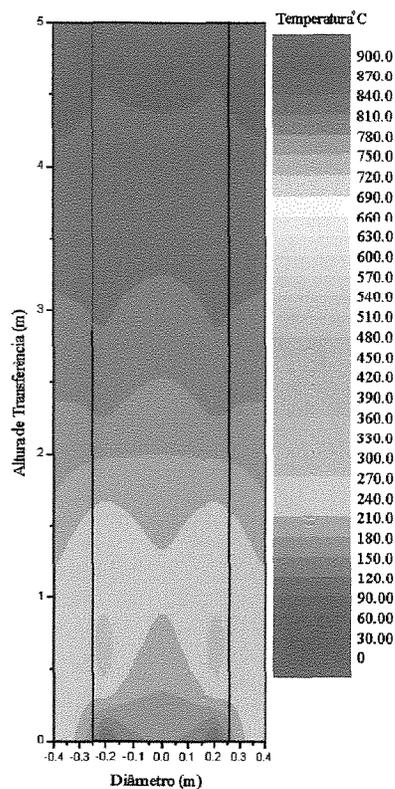


Figura 40. Perfil de temperatura da UPMP com 130000 kcal/h após 4 horas ligado.

Pode-se notar o aquecimento no começo da unidade e sua progressão axial.

A Figura 41 ilustra um perfil de temperatura do estado transiente de aquecimento da unidade instantes mais tarde.

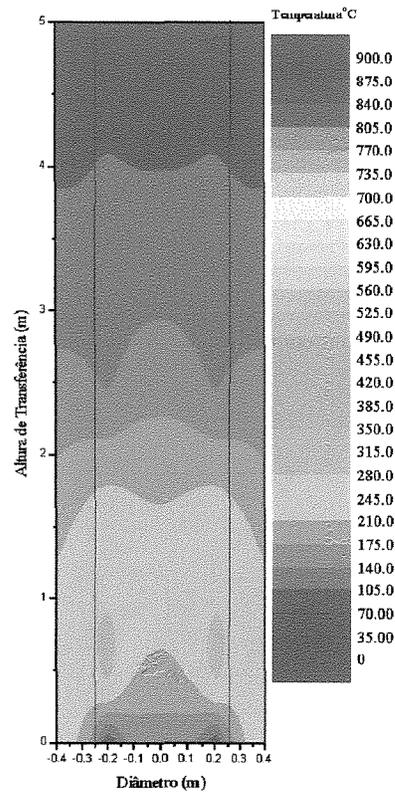


Figura 41. Perfil de temperatura da UPMP com 130000 kcal/h após 4:35h ligado.

Pode-se reparar que a zona de aquecimento aumentou, e a zona que encontrava-se fria também iniciou aquecimento, porém muito distante do estado estacionário. A Figura 42 mostra o perfil de temperatura uma pouco mais desenvolvido.

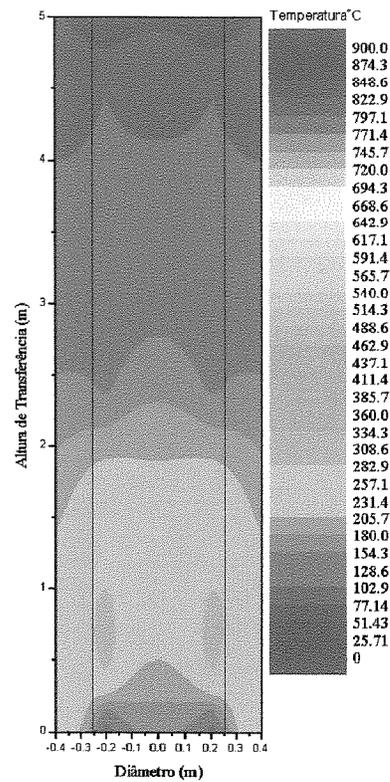


Figura 42. Perfil de temperatura da UPMP com 130000 kcal/h após 5:10h ligado.

Percebe-se um maior aquecimento no interior do reator, e isto deve-se ao fato que a atmosfera dentro do reator encontrava-se parada. Um aumento maior ainda nesta zona pode ser visto na Figura 43.

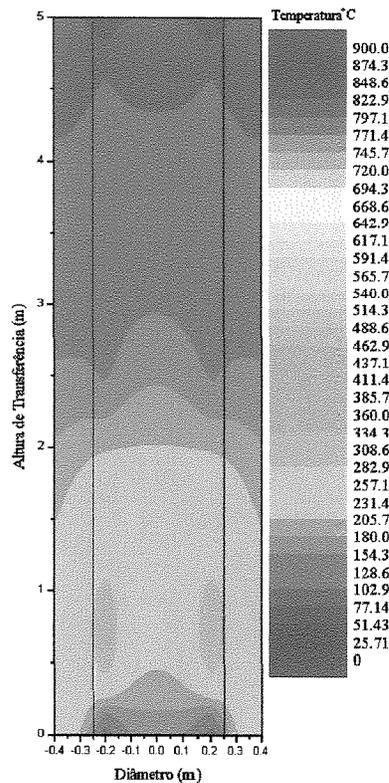


Figura 43. Perfil de temperatura da UPMP com 130000 kcal/h após 6:10h ligado.

Repara-se que o perfil de temperatura transiente encontra-se muito diferente do estado estacionário sugerido pelo modelo. Isto deve-se em muito a capacidade pequena de geração de depressão do exaustor no sistema de aquecimento e a não tiragem suficiente dos gases de combustão pelo sistema de exaustão, a ponto de alcançar mais rapidamente o regime permanente do processo. Pode-se reparar ainda que a medida que a temperatura sobe a convecção exerce influência neste processo.

A influência da circulação e adição do nitrogênio no interior do reator pode ser visto na Figura 44.



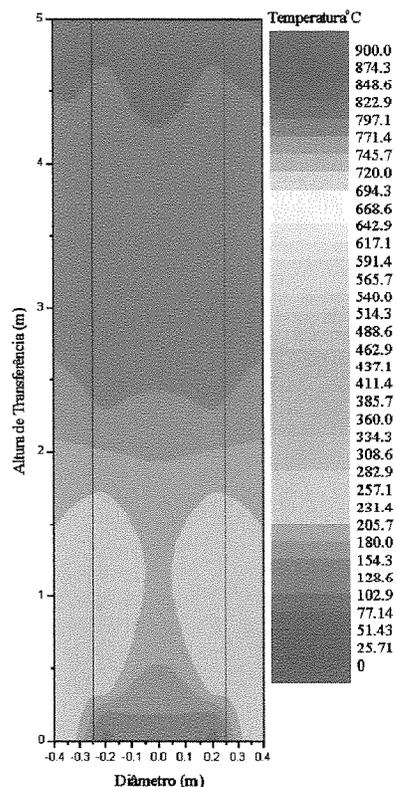


Figura 44. Perfil de temperatura da UPMP com 130000 kcal/h após adição de N₂.

Esta Figura ilustra uma queda de temperatura significativa e o desaparecimento das zonas elevadas de aquecimento no interior da unidade.

O perfil de temperatura 25 minutos após a adição do nitrogênio pode ser visto na Figura 45.

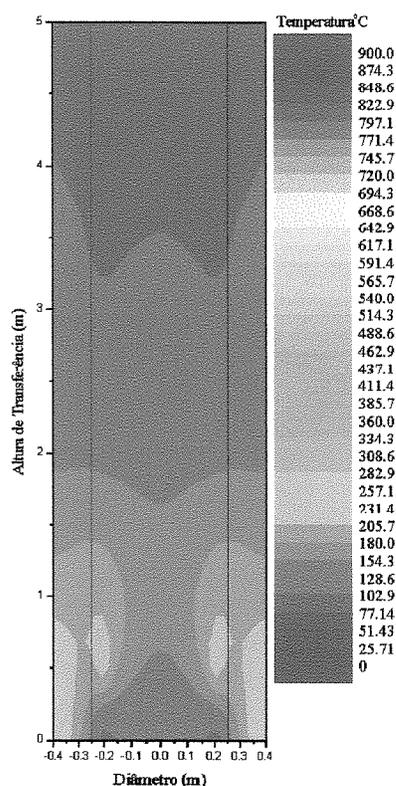


Figura 45. Perfil de Temperatura da UPMP com 130000 kcal/h 25min. após adição de N₂.

Através destes perfis observou-se uma incapacidade do exaustor realizar a tiragem dos gases. O que sugere-se é a substituição do exaustor por um maior e o início do aquecimento da unidade com o nitrogênio, para evitar uma perda grande de energia durante o processo de adição deste gás.

Porém atingiu-se temperaturas na casa dos 350°C o que motiva para as modificações necessárias e a realização das propostas futuras de implementação, verificação e validação da metodologia.

Pode-se observar na Figura 46, uma vista frontal da unidade montada e pronta para operar. Vislumbra-se agora com uma série de estudos posteriores, que possa fornecer informações sobre o processo de pirólise de resíduos em escala piloto, para com isso possibilitar estudos de ampliação de escala.



Figura 44. Vista frontal da UPMP

Capítulo 6

6 Conclusões e Sugestões

As conclusões e sugestões futuras são apresentadas neste capítulo.

Com os resultados obtidos, consolidou-se a modelagem matemática unidimensional para projeto, construção e montagem da unidade piloto multi-propósito, para pirólise de resíduos sólidos.

A simulação foi empregada com sucesso para o projeto, demonstrando a possibilidade de utilização de um modelo relativamente simples para estudos avançados de ampliação de escala do processo.

Para trabalhos futuros pretende-se desenvolver um planejamento experimental que orientará a execução de experimentos e a aquisição de dados experimentais para a corroboração do modelo e da metodologia.

Vislumbra-se a aplicação da UPMP para uma gama de resíduos sólidos cujo destino final e adequado carece, atualmente, de solução.

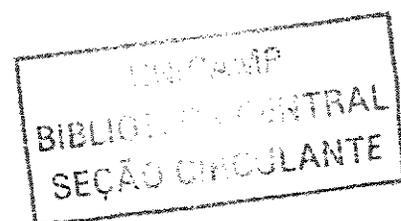
Com base nos resultados obtidos neste projeto, e tendo vista a infra-estrutura disposta propõe-se como sugestões os seguintes:

- Implementação da metodologia para determinação dos parâmetros térmicos e cinéticos para várias classes resíduos;
- Estudo da produção de micro-sílica através da pirólise de casca de arroz;
- Sofisticação do modelo para representar melhor o processo;
- Estudo da fluidodinâmica do reator, visto que podem ocorrer fenômenos de defluidização (Arena *et al*, 2001);
- Análise qualitativa e quantitativa dos produtos gerados da reação;
- Estudo da pirólise em duas etapas de PVC poli(vinilcloro), de forma a conseguir a liberação do cloro a baixa temperatura para reutilizá-lo,

evitando assim a disposição deste material em aterros, e a geração de organoclorados nas unidades de incineração (Karayildirim *et al*, 2001);

- Verificação e análise da influência do tempo de residência e faixa de temperatura sobre as frações de produtos e produtos gerados (Milne, 1999);
- Dada a complexidade do processo pode-se aprimorar o sistema de controle da unidade.
- Estudo de processos, equipamentos e instalação de uma unidade de tratamento de gases;
- Estudo da viabilidade do uso de produtos gerados pela reação como fonte de energia para o processo, tornando-o auto-térmico;
- Análise dos resíduos municipais da região do Vale do Itajaí, de modo a quantificar e qualificar os resíduos para que se possa adequar o processo a estes.

Convém salientar que estas sugestões estão sendo tomadas como base para o projeto de uma tese de doutoramento, a ser iniciada com a conclusão do mestrado.



Capítulo 7

7 Referências Bibliográficas

O Capítulo 7 apresenta as referências bibliográficas utilizadas na elaboração desta dissertação.

ALLRED, V.D. (1966), Kinetics of Oil Shale Pyrolysis, Chem. Eng. Prog. Symp. Series, 63, 100 – 111.

ARENA, U., MASTELLONE, M.L., (2001) “The phenomenology of bed defluidization during the pyrolysis of a food-packaging plastic waste” Powder Technology 120 127-133.

BAUM, B., PARKER C. H., (1974), “Solid Waste Disposal Volume 2 Reuse, Recycle and Pyrolysis” ann arbor science Publishers Inc.

BOCKHORN, H., HENTSCHEL, J., HORNUNG, A., HORNUNG, U. (1999) “Environmental engineering: Stepwise pyrolysis of plastic waste.” Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 54 3043-3051

BOCKHORN, H., HORNUNG, A., HORNUNG, U. (1998) “Stepwise pyrolysis for raw material recovery from plastic waste.” Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 46 1-13.

CEAMANOS, J., MASTRAL, J.F., MILLERA, A., ALDEA, M.E. (2002) “Kinetics os pyrolysis os high density polyethylene. Comparison of isothermal and dynamic experiments” Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 65 93-110

CHAPRA, S.C., CANALE, R.P., (1990) “Numerical Methods for Engineers” Second Edition, McGraw Hill International Editions.

CHIEN, Y.C., WANG, H. P., LIN, K.S.,HUANG, Y.J.,YANG, Y.W., (2000) “Fate of Bromine in pyrolysis of printed circuit board wastes”,Chemosphere 40 383-387

DAVIS, M.E., (1978) Numerical Methods and Modeling for Chemical Engineers, Ed. John Wiley & Sons, New York.

HAIRSTON, D., (2002), “Pyrolysis Gets All Fires Up”, Newsfront, Chemical Engineering.

INCROPERA, FRANK P., DEWITT, D. (1990), Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Wiley.

KAMYNSKY, W., “Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry, Verlag Chemie, Weinheim, 1992, A21 p57.

KARAYILDIRIM, T., YANIK, J., UÇAR, S., SAGLAM, M., YÜKSEL, M. (2001) “Conversion of plastics/HVGO mixtures to fuels by two-step processing.” Fuel Processing Technology. 73 23-25

KASTNER, H., KAMINSKY, W., (1995) Hydrocarbon Process. May 109.

LOVETT, S., BERRUTI, F., BEHIE, L.A., Ind. Eng. Chem. Res. 36 (1997) 4436.

MANRICH, S., FRATTINI,G., ROSALINI, A.C., (1997) Identificação de polímeros: uma ferramenta para reciclagem. EDUFSCar, 49p.

MARTIGNONI, W.P., GOLDSTEIN, L. JR., SANTANA, C.C., (1987) “Estudo preliminar da modelagem da pirólise de finos de xisto em leito de arraste”, Anais do I Congresso Brasileiro de Transferência de Calor e Massa, 367 – 377.

MASTRAL, F. J., ESPERANZA, E., GARCÍA, P., JUSTE, M. (2002) “Pyrolysis of high-density polyethylene in a fluidised bed reactor. Influence of the temperature and residence time.” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 63 1-15

MEIER, H. F. (1990), “Modelagem, Simulação e Otimização de um Reator de Leito Móvel para Pirólise de Finos de Xisto”, Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 218p.

MILNE, B.J., BEHIE, L.A., FERRUTI, F., (1999) *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 51 157-166

MILNE, J.B., BEHIE, L.A., BERRUTI, F., (1999) “*Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*” 51 157.

MURENA, F. (2000) “Kinetics of Sulphur Compounds in Waste Tyres Pyrolysis”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*” 56, 195-205.

NUNHEZ, J. R. (1990) “Método Spline Modificado: Acoplamento do Método da Máxima Verossimilhança ao Método Spline.”, Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 116p.

PERRY, R. H., GREEN, D. W., MALONEY, J.O., (1997), “*Chemical Engineering – Handbook*”, Seventh Edition.

RAMDOSS, P.K., TARRER, A.R., (1998) *Fuel* 77 (4), 293-299.

REID, R.C., PRAUSNITZ, J.M., POLING, B.E., (1988) *The Properties of Gases and Liquids*, 4th Edition, Ed. McGraw-Hill Book Company.

SCHIMIDT, H., KAMINSKY, W., (2001) “Pyrolysis of oil sludge in a fluidised bed reactor”, *Chemosphere* 45, 285-290.

WILLIAMS, E. A., WILLIAMS, P. T., (1997) “Analysis of products derived from the fast pyrolysis of plastic waste.” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 40-41, 347-363

WILLIAMS, P. T., WILLIAMS, E. A., (1999) “Fluidised bed pyrolysis of low density polyethylene to produce petrochemical feedstock.” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 51 107-126.

Capítulo 8

8 Anexos

Memorial de Cálculo do Modelo Macroscópico.

Cálculo do Coeficiente de Transf. Convectiva Ext.			
Entre com a Capacidade do Queimador (80000 à 180000kcal/h)		80000	kcal/h
Entre com o Poder Calorífico Inferior do Combustível		11006.259	kcal/h
massa de combustível=		7.2685915	kg/h
Entre com a Vazão Volumétrica dos Produtos (vol. Prod Cgcomb)=		182.4	m ³ /Nm ³ de comb
Entre com a Densidade do combustível		2.237	kg/Nm ³
Qcomb=		3.2492586	Nm ³ /h
Qprod=		592.66477	m ³ /h
Cálculo da Velocidade Média do Gás de Combustão		v =	30.533838 m/s
Entre com o Cp médio do Gás de Combustão	Cp =	0.268	kcal/kg.K
Entre com a Densidade do Gás de Combustão	ρ =	0.397	kg/m ³
Entre com a Viscosidade do Gás de Combustão	μ =	0.000042	kg/m.s
Entre com a Condutividade Térmica do Gás de Combustão	k gas =	0.0766	Kcal/mhC
Cálculo do número de Reynolds do Gás de Combustão		Re =	12352.828
Cálculo do Número de Prandtl		Pr =	0.5290026
Cálculo do Número de Nussel		Nu =	33.459856
Cálculo do Coeficiente de Transf. Convectiva de Calor Ext.		h prod. =	59.883762 kcal/m ² .h.C

Cálculo do Coeficiente de Transf. Convectiva de Calor Int.			
Entre com a Densidade do Fluido	ρ =	0.929	Kg/m ³
Entre com a Viscosidade do Fluido	μ =	0.000042	kg/m.s
Entre com o Cp do Fluido	Cp =	0.268	kcal/Kg.C
Entre com a Condutibilidade Térmica do Aço k=		25.3	kcal/h.m.C
Entre c/ a Condutividade Térm. do gás de Comb.=		0.0766	Kcal/mhC
Cálculo da Velocidade Média do Fluido	v =	16.6989132	m/s
Cálculo do Reynolds do Fluido	Re f=	18763.69406	
Cálculo do Número de Prandtl	Pr =	0.529002611	
Cálculo do Número de Nussel	Nu =	46.74828003	
Cálculo do Coef. Transf. Conv. Calor Int. h reag=			70.49051673 kcal/h.m ² .C

Massa de Produtos resultantes da pirólise	
m. reag. =	0.042125 kg/s
m. reag. =	151.6485 kg/h

Cálculo do Coeficiente Global de Temperatura		Tgc =	1000 C	Tp =	100 C
Cálculo do Coeficiente Global de Temperatura para o Reator de 10 Aletas					
Uext =	17.618669 kcal/h.m2.K	U.A =	9.213376 kcal/h.K	q =	8292.038 kcal/h
Cálculo do Coeficiente Global de Temperatura para o Reator de 8 Aletas					
Uext =	20.554909 kcal/h.m2.K	U.A =	7.326472 kcal/h.K	q =	6593.825 kcal/h
Cálculo do Coeficiente Global de Temperatura para o Reator de 16 Aletas					
Uext =	15.087914 kcal/h.m2.K	U.A =	8.344904 kcal/h.K	q =	7510.414 kcal/h
Cálculo das Temperaturas ao final de cada módulo de reator					
		Tps =	304.0273 C		
		Tps2 =	466.2698 C		
		Tps3 =	651.0651 C		
		Tps4 =	813.3075 C		
		Tps5 =	998.1028 C		

Memorial dos Dados Experimentais

Dados Experimentais Figura 40.			Dados Experimentais Figura 41.			Dados Experimentais Figura 42.		
Tgc	Tf		Tgc	Tf		Tgc	Tf	
1	266	53	1	265	53	1	274	50
2	221	313	2	225	325	2	226	335
3	157	230	3	263	244	3	168	254
4	129	122	4	136	130	4	140	137
5	88	112	5	92	120	5	94	123
6	75	94	6	79	99	6	79	104
7		65	7		56	7		56

Dados Experimentais Figura 43.			Dados Experimentais Figura 44.			Dados Experimentais Figura 45.		
Tgc	Tf		Tgc	Tf		Tgc	Tf	
1	276	52	1	270	48	1	259	65
2	229	341	2	235	290	2	190	233
3	173	258	3	172	227	3	140	173
4	144	146	4	149	133	4	126	120
5	99	130	5	108	104	5	99	95
6	83	112	6	94	114	6	91	104
7		60	7		87	7		86