

ANA ROSA COSTA MUNIZ

**OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE UM REATOR DE
PIRÓLISE DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito final à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Ariovaldo Bolzan, Dr.

Florianópolis, março de 2004

Otimização da Operação de um Reator de Pirólise de Resíduos Sólidos Industriais

Por

Ana Rosa Costa Muniz

Tese julgada para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Química**, área de concentração **Desenvolvimento de Processos Químicos e Biotecnológicos** e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Dr. Arioaldo Bolzan
Orientador

Prof. Dr. Agenor Furigo Junior
Coordenador do CPGENQ

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Arioaldo Bolzan

Prof. Dr. Henry França Meier

Prof. Dr. M. M. Mazzuco

Prof. Dr. Leonel Teixeira Pinto

Prof. Dra. Selene Maria Arruda Guelli Ulson de Souza

Florianópolis, 12 de março de 2004

Ao meu querido esposo,

Luis Antonio Rezende Muniz

*em gratidão pelo grande e contínuo apoio no dia-a-dia do meu viver e no conquistar
de novos horizontes....*

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar minha sincera e profunda gratidão para as seguintes pessoas e instituições que contribuíram para a realização deste trabalho:

Ao professor Ariovaldo Bolzan pela orientação e incentivo permanente.

Aos colegas de doutorado Luis Antonio Rezende Muniz, Evandro Steffani, Carlos Alberto Claumann e Jaime Eduardo Navarrete Rodriguez pelas valiosas contribuições tanto no âmbito profissional quanto pessoal.

Aos meus alunos de iniciação científica da UCS pelo trabalho sério e responsável.

Aos professores e funcionários da UCS pelo apoio oferecido e convívio gratificante.

A FAPERGS, UCS e UFSC que em conjunto possibilitaram a realização deste trabalho.

A todos os meus familiares e amigos pessoais pela sincera e duradoura amizade.

RESUMO

COSTA-MUNIZ, Ana Rosa. **Otimização da Operação de um Reator de Pirólise de Resíduos Sólidos Industriais**. Florianópolis, 2004. 197p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Ariovaldo Bolzan

Defesa: 12/03/2004

Neste trabalho é realizado o estudo do caso da reciclagem, por pirólise, de resíduos poliméricos provenientes de empresas da região nordeste do estado do Rio Grande do Sul, que são considerados críticos no que se refere ao volume gerado e ao grau de periculosidade. Os resíduos estudados foram: Polipropileno(PP), Acrilonitrila-Butadieno-Estireno(ABS) e resíduo de tinta de origem poliuretânica. Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia para otimizar a operação de um reator de pirólise multiprodutos, cujos maiores desafios são gerar produtos que sejam atóxicos e aproveitados no mercado a preços competitivos, remunerar o capital investido para desenvolver, montar e operar a planta de pirólise, e utilizar um método de otimização viável para um sistema de produção batelada multiprodutos. Para este propósito, o trabalho é composto por três partes principais: a) aquisição *on line* de dados, através de um sistema experimental montado em escala de bancada; b) levantamento de informações, em campo, sobre a região de inserção da planta de pirólise; e c) desenvolvimento de um código computacional para a otimização do reator pirólítico. A otimização da planta de pirólise multiprodutos consistiu na atualização do sequenciamento da produção e dos *set points* operacionais necessários para atingir os objetivos do planejamento de produção, dentro de um horizonte de tempo de um mês através da maximização de uma função lucro. Essa função envolveu dados técnicos e econômicos, como temperatura e tempo de batelada, preços e quantidades processadas e produzidas de resíduos e de óleos, respectivamente, quantidades consumidas e geradas de gases combustíveis e restrições de demanda de matérias-primas e produtos. Esse problema de otimização foi resolvido através de uma metodologia de solução utilizando Algoritmos Genéticos. O resultado é um código computacional flexível, que permite *rescheduling* para absorver as variações das necessidades de mercado, capacidade de produção e condições operacionais, dentro de um tempo computacional viável e que pode ser usado para vários resíduos, onde o rendimento de produtos e a energia envolvida no processo são determinados sem o conhecimento prévio da cinética e do calor das reações de pirólise.

Palavras-chave: pirólise; planejamento de produção; otimização.

ABSTRACT

COSTA-MUNIZ, Ana Rosa. **Optimization of Operation of a Pyrolysis Reactor of Industrial Solid Wastes.** Florianópolis, 2004. 197p. Thesis (Doctor in Chemical Engineering) – Chemical Engineering Post graduate Programme, Universidade Federal de Santa Catarina.

Advisor: Ariovaldo Bolzan

Date: 12/04/2004

In this work, a case study of recycling of polymeric wastes through pyrolysis is carried out. These wastes were originated from companies of the South of Brazil and are considered critical regarding their generated volume and harmfulness degree. The studied wastes were: Polypropylene(PP), Acrylonitrile Butadiene Styrene(ABS) and paint sludge waste. In this work it was developed a methodology for the optimization of a multiproduct pyrolysis reactor operation, where the biggest challenges are: to generate non-toxic products and insert them into the market with competitive price, to return the invested capital to develop, to assemble and to operate the pyrolysis plant, as well as, to utilize a viable method of optimization for a batch multiproduct production system. For that, this work is composed by three main parts: a) online data acquisition through an experimental system assembled in bench-scale; b) gathering information, in field, about the region where the pyrolysis plant is to be inserted; and c) development of an optimization software. The optimization of the multiproduct pyrolysis plant consisted in the actualization, in a month, of the production sequencing and of the operational set points that are needed to reach the objectives of the production planning, through the maximization of a profit function. This function involved economical and technical data such as, temperature and batch time, prices and, processed waste and produced oil amounts, consumed and generated amounts of combustible gases as well as restrictions on the raw material and product's demand. This optimization problem was solved through a solution methodology using Genetic Algorithms. The result is a flexible computational code that permits rescheduling to accommodate today's fast changes in market requirements, production capacities and operational conditions with a viable computational time, and can be used with a lot of wastes which the yield and the energy evolved are predict without the previous knowledge of kinectic and heat of the pyrolysis reactions.

Keywords: pyrolysis, production planning, optimization.

SUMÁRIO

| | |
|---|-------------|
| LISTA DE FIGURAS | xi |
| LISTA DE TABELAS..... | xiii |
| NOMENCLATURA..... | xv |
| Capítulo 1: Introdução..... | 1 |
| 1.1 Motivação | 1 |
| 1.2 Pirólise | 2 |
| 1.3 Administração da Produção | 4 |
| 1.4 A Pesquisa Operacional (Otimização)..... | 5 |
| 1.4.1 Algoritmos Genéticos | 7 |
| 1.4.2 Programação Evolucionária..... | 7 |
| 1.4.3 Estratégias Evolucionárias..... | 7 |
| 1.4.4 Programação Genética | 8 |
| 1.4.5 Estratégia de Colônia | 8 |
| 1.5 Organização da Tese | 9 |
| Capítulo 2: Objetivo | 10 |
| 2.1 Objetivo Geral | 10 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 10 |
| Capítulo 3: O Estado da Arte..... | 12 |
| 3.1 Reciclagem de Resíduos Poliméricos | 13 |
| 3.2 O Processo de Pirólise..... | 14 |
| 3.3 Pirólise de Resíduos Poliméricos..... | 16 |
| 3.4 Classificação de Resíduos Sólidos Industriais: | 22 |
| 3.5 Análise Econômica de uma Planta de Pirólise de Resíduos Sólidos Industriais | 24 |
| 3.5.1 Viabilidade Econômica..... | 25 |
| 3.6 O Planejamento da Produção | 31 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 3.6.1 | Classificação do Problema de Planejamento da Produção | 32 |
| 3.7 | <i>Scheduling</i> de Processos em Batelada | 34 |
| 3.8 | Modelagem de Plantas Multiprodutos | 38 |
| 3.9 | Algoritmos Genéticos Aplicados a Problemas de Larga Escala | 44 |
| Capítulo 4: Fundamentos Teóricos | | 47 |
| 4.1 | Formulação do Problema | 47 |
| 4.1.1 | Variável de projeto..... | 48 |
| 4.1.2 | Restrições | 48 |
| 4.1.3 | Espaço de Busca ou Região Viável..... | 48 |
| 4.1.4 | Função Objetiva ou de Avaliação | 49 |
| 4.1.5 | Ponto Ótimo | 49 |
| 4.1.6 | Valor Ótimo | 49 |
| 4.1.7 | Solução Ótima..... | 49 |
| 4.2 | Introdução ao Método de Algoritmos Genéticos..... | 49 |
| 4.3 | Definição e Funcionamento do Método | 51 |
| 4.4 | Diferenças entre os Algoritmos Genéticos e os Métodos Tradicionais de Otimização | 52 |
| 4.5 | Terminologia empregada em Algoritmos Genéticos | 53 |
| 4.6 | O “Algoritmo Genético Genérico” (<i>AGG</i>) | 54 |
| 4.7 | Parâmetros Genéticos | 56 |
| 4.7.1 | Tamanho da População..... | 56 |
| 4.7.2 | Taxa de <i>Crossover</i> | 56 |
| 4.7.3 | Taxa de Mutação..... | 57 |
| 4.8 | Operadores Genéticos | 58 |
| 4.8.1 | Seleção | 58 |
| 4.8.2 | <i>Crossover</i> | 59 |
| 4.8.3 | Mutação..... | 61 |
| 4.8.4 | Escalonamento | 62 |
| 4.8.5 | Elitismo | 66 |
| 4.9 | Algoritmos Genéticos em Codificação Real | 67 |
| 4.9.1 | Introdução | 67 |

| | |
|---|-----------|
| 4.9.2 Operadores Genéticos em Codificação Real..... | 69 |
| Capítulo 5:Metodologia | 74 |
| 5.1 Caracterização da Região de Estudo..... | 75 |
| 5.1.1 Matérias Primas | 76 |
| 5.2 Caracterização de Produtos | 76 |
| 5.2.1 Equipamentos do Aparato Experimental | 78 |
| 5.2.2 Descrição do Processo | 79 |
| 5.2.3 Análise de Produtos | 80 |
| 5.3 Aquisição <i>On Line</i> De Dados..... | 83 |
| 5.4 Ajuste de Dados Experimentais | 83 |
| 5.5 Modelagem de Planta Batelada Multiprodutos | 84 |
| 5.5.1 Características do modelo..... | 84 |
| 5.5.2 Parâmetros e variáveis do modelo..... | 84 |
| 5.5.3 Restrições | 87 |
| 5.5.4 Modelo de planejamento de produção | 91 |
| 5.6 Otimização..... | 91 |
| 5.7 Estudo de Viabilidade Econômica | 95 |
| 5.7.1 Receita..... | 95 |
| 5.7.2 Custos Operacionais | 96 |
| Capítulo 6:Aplicação | 98 |
| 6.1 Área de Abrangência..... | 98 |
| 6.2 Inventário de Resíduos Sólidos Industriais..... | 99 |
| 6.3 Aspectos Legais..... | 102 |
| 6.4 Equipamentos do Aparato Experimental de Pirólise..... | 103 |
| 6.4.1 Equipamentos de Reação e Separação | 104 |
| 6.4.2 Equipamentos de Controle..... | 107 |
| 6.4.3 Equipamentos de Análise | 108 |
| 6.5 Simulação | 113 |
| 6.5.1 Dados de Entrada | 113 |
| 6.5.2 Restrições | 115 |

| | |
|--|------------|
| Capítulo 7: Resultados | 118 |
| 7.1 Caracterização de Produtos | 118 |
| 7.1.1 Produtos Gasosos | 119 |
| 7.1.2 Produtos Líquidos | 121 |
| 7.1.3 A Fase Sólida | 127 |
| 7.2 Modelagem | 128 |
| 7.2.1 Rendimento de óleos..... | 128 |
| 7.2.2 Energia | 131 |
| 7.3 Simulação | 144 |
| 7.3.1 Função Objetiva | 145 |
| 7.3.2 Planejamento de Produção..... | 147 |
| 7.3.3 Sequenciamento de Produção..... | 151 |
| 7.3.4 <i>Rescheduling</i> | 151 |
| 7.4 Viabilidade Econômica | 155 |
| 7.4.1 Investimento Total do Capital (ITC)..... | 155 |
| Capítulo 8: Conclusões..... | 157 |
| 8.1 Contribuições..... | 157 |
| 8.2 Conclusões dos Resultados | 157 |
| 8.2.1 Compostos Orgânicos Voláteis | 157 |
| 8.2.2 Óleos..... | 158 |
| 8.2.3 Viabilidade Econômica..... | 158 |
| 8.2.4 Modelagem e Simulação | 159 |
| 8.2.5 Algoritmos Genéticos | 159 |
| 8.3 Conclusão Geral | 160 |
| 8.4 Trabalhos Futuros | 160 |
| Referências Bibliográficas | 162 |
| Sites Consultados | 171 |
| Anexos | 172 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1-1 Sub-áreas da inteligência artificial | 6 |
| Figura 3-1 Operação não cruzada sem tempo morto..... | 35 |
| Figura 3-2 Operação cruzada sem tempo morto..... | 36 |
| Figura 3-3 Planta flowshop | 37 |
| Figura 3-4 Planta jobshop..... | 37 |
| Figura 3-5 Hierarquia das operações de processo | 40 |
| Figura 4-1 Representação algorítmica de operação de um AGG..... | 55 |
| Figura 4-2 Amostragem universal estocástica | 59 |
| Figura 4-3 Ilustração do funcionamento do <i>crossover</i> 1-ponto | 60 |
| Figura 4-4 Mutação ocorrida em um gene da <i>string</i> | 62 |
| Figura 4-5 Fluxograma do algoritmo genético em codificação real | 73 |
| Figura 5-1 Fluxograma representativo da metodologia utilizada..... | 75 |
| Figura 5-2 Dados coletados e variáveis modeladas a partir do aparato experimental 1..... | 77 |
| Figura 5-3 Dados coletados e variáveis modeladas a partir do aparato experimental 2..... | 78 |
| Figura 5-4 Fluxograma esquemático do processo de pirólise | 80 |
| Figura 5-5 Estrutura analítica usada na análise de produtos | 81 |
| Figura 5-6 Fluxograma demonstrativo da formação de uma <i>string</i> | 93 |
| Figura 6-1 Aparato experimental constituído por retorta, vaso separador e sistema de análise | 105 |
| Figura 6-2 Foto do sistema pirolítico usado para aquisição <i>on line</i> de dados de energia | 106 |
| Figura 6-3 Calorímetro Babelsberg..... | 111 |
| Figura 6-4 Viscosímetro Brookfield DV++, modelo LV | 112 |
| Figura 6-5 Ponto de fulgor pelo método Pensky-Martens ASTM D-93 MB-48 modelo PD-530 e 540 | 113 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6-6 Dados de entrada usados na simulação | 114 |
| Figura 7-1 Influência da temperatura e tempo de batelada sobre o rendimento de óleo obtido a partir de resíduo ABS | 129 |
| Figura 7-2 Influência da temperatura e tempo de batelada sobre o rendimento de óleo obtido a partir de resíduo PP..... | 130 |
| Figura 7-3 Influência da temperatura e tempo de batelada sobre o rendimento de óleo obtido a partir de resíduo de borra de tinta..... | 131 |
| Figura 7-4 Comparação entre valores de energia transiente preditos e experimentais para resíduo de ABS | 135 |
| Figura 7-5 Comparação entre valores de energia transiente preditos e experimentais para resíduo de borra de tinta | 135 |
| Figura 7-6 Comparação entre valores de energia transiente preditos e experimentais para resíduo de PP | 136 |
| Figura 7-7 Comparação entre valores de potência permanente predita e experimental para resíduo de ABS | 140 |
| Figura 7-8 Comparação entre valores de potência permanente predita e experimental para resíduo de borra de tinta | 140 |
| Figura 7-9 Comparação entre valores de potência permanente predita e experimental para resíduo de PP | 141 |
| Figura 7-10 Ajuste para determinação do coeficiente global de troca térmica..... | 144 |
| Figura 7-11 Influência do tamanho da população sobre a função objetivo | 146 |
| Figura 7-12 Comparação da função objetivo com <i>crossover</i> interpolador e extrapolador | 146 |
| Figura 7-13 O efeito do escalonamento sobre a função objetivo | 147 |
| Figura 7-14 Influência do <i>rescheduling</i> sobre o número de bateladas de ABS,PP e borra de tinta | 153 |
| Figura 7-15 Influência do <i>rescheduling</i> sobre a quantidade processada de ABS, PP e Borra de Tinta | 153 |
| Figura 7-16 Influência do <i>rescheduling</i> sobre a quantidade produzida de óleo combustível ... | 154 |
| Figura 7-17 Influência do <i>rescheduling</i> sobre a quantidade produzida de óleo inflamável..... | 154 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 3-1 Processos de pirólise de plásticos e outros resíduos poliméricos | 28 |
| Tabela 4-1 Comparação entre terminologia natural e <i>AGs</i> | 53 |
| Tabela 5-1 Características dos óleos | 82 |
| Tabela 5-2 Operadores e parâmetros genéticos usados na simulação..... | 94 |
| Tabela 6-1 Composição da economia industrial..... | 99 |
| Tabela 6-2 Principais resíduos gerados no município de Caxias do Sul | 100 |
| Tabela 6-3 Geração de resíduos sólidos em Caxias do Sul, 1992..... | 101 |
| Tabela 6-4 Geração de resíduos sólidos em Caxias do Sul, 1996..... | 101 |
| Tabela 6-5 Geração de resíduos sólidos em Caxias do Sul, 2002..... | 102 |
| Tabela 6-6 Aspectos dimensionais da retorta | 104 |
| Tabela 6-7 Características físicas do reator pirolítico | 106 |
| Tabela 6-8 Condições operacionais do cromatógrafo para análise dos produtos gasosos | 108 |
| Tabela 6-9 Propriedades e aspectos dimensionais do reator usado na simulação | 114 |
| Tabela 6-10 Propriedades termofísicas dos resíduos ABS, borra de tinta e PP..... | 115 |
| Tabela 7-1 Condições operacionais das reações de pirólise..... | 119 |
| Tabela 7-2 Análise cromatográfica da fase gasosa produzida por resíduo PP | 120 |
| Tabela 7-3 Análise cromatográfica da fase gasosa produzida por resíduo de ABS | 120 |
| Tabela 7-4 Análise cromatográfica da fase gasosa produzida por resíduo de borra de tinta | 120 |
| Tabela 7-5 Composição por classe química - Resíduo de borra de tinta | 121 |
| Tabela 7-6 Composição por classe química - Resíduo de PP | 122 |
| Tabela 7-7 Identificação por número de carbonos da fase líquida obtida de resíduo de borra de tinta..... | 123 |
| Tabela 7-8 Identificação por número de carbonos da fase líquida obtida de resíduo de PP | 124 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 7-9- Identificação por número de carbonos da fase líquida obtida de resíduo de ABS | 126 |
| Tabela 7-10 Propriedades físicas dos óleos produzidos por pirólise | 127 |
| Tabela 7-11 Análise de "borra de tinta" após pirólise por espectrometria de fluorescência de raio X..... | 128 |
| Tabela 7-12Energia consumida até estabilização da temperatura de reação com alimentação de ABS | 132 |
| Tabela 7-13Energia consumida até estabilização da temperatura de reação com alimentação de borra de tinta | 133 |
| Tabela 7-14 Energia consumida até estabilização da temperatura de reação com alimentação de PP | 134 |
| Tabela 7-15 Potência consumida na temperatura de reação com alimentação de ABS..... | 137 |
| Tabela 7-16 Potência consumida na temperatura de reação com alimentação de borra de tinta | 138 |
| Tabela 7-17 Potência consumida na temperatura de reação com alimentação de PP | 139 |
| Tabela 7-18 Calor de combustão dos gases resultantes da pirólise com resíduo ABS | 142 |
| Tabela 7-19 Calor de combustão dos gases resultantes da pirólise com resíduo de borra de tinta | 142 |
| Tabela 7-20 Calor de combustão dos gases resultantes da pirólise com resíduo de PP | 143 |
| Tabela 7-21 Planejamento de produção para população de 100 indivíduos e 2000 gerações .. | 148 |
| Tabela 7-22 Resumo do planejamento de produção para pop=100 indivíduos..... | 150 |
| Tabela 7-23Resumo do planejamento de produção com <i>rescheduling</i> | 152 |
| Tabela 7-24 Custos com equipamentos obtidos de fornecedores | 155 |
| Tabela 7-25 Custos de investimento | 156 |

NOMENCLATURA

A = área de troca térmica/equivalente em água do calorímetro

a, b, c, a^*, b^* = coeficientes da função de escalonamento/probabilidade de seleção

$C_{\bar{t}}$ = custo unitário de gás combustível no período t

C_{mult} = valor constante maior que 1 (*um*)

cp_i = calor específico do resíduo i

cp_{RE} = calor específico do aço inoxidável 316

CTP_t = custo total de produção no período t

$D_{combustível}$ = taxa de demanda de óleo combustível

$D_{inflamável}$ = taxa de demanda de óleo inflamável

D_{max_j} = demanda máxima do produto j

D_{min_j} = demanda mínima do produto j

EG_i = energia gerada pelos gases da reação com resíduo i

ET_i = energia consumida pelo resíduo i no estado transiente

e_1 = correção para a formação do ácido nítrico

e_2 = correção para o poder calorífico do fio de ignição

F = *fitness* escalonado

f = *fitness* natural

$f(x^*)$ = valor ótimo da função objetivo

F_{max} = é o *fitness* escalonado do melhor indivíduo da população

F_{med} = *fitness* médio

f_{med} = *fitness* natural médio

F_{min} = é o *fitness* do pior indivíduo da população

GC_{it} = massa de gás combustível consumida no processamento do resíduo i no tempo t

GL_t = massa líquida de gás combustível no período t

GP_{it} = massa de gás combustível produzida a partir do resíduo i no período t

H_i = poder calorífico inferior

H_s = poder calorífico superior

H_t = comprimento do período t

i = resíduo

j = produto/estágio

k = número de bateladas

L = comprimento dos cromossomos

M = número máximo de estágios

m = massa de amostra usada em ensaio calorimétrico

m_i = massa do resíduo i

m_{RE} = massa do reator (aço inoxidável 316)

N = tamanho da população

Nb_{it} = número total de bateladas do resíduo i durante o tempo t ;

$Omax_i$ = oferta máxima de resíduo i

P = probabilidade de seleção/número de produtos

P_c = probabilidade de *crossover*

PE = potência que entra no reator

P_{it} = preço do resíduo i no período t

P_m = probabilidade de mutação

PP_i = potência necessária para manter a temperatura da reação

PPe_i = potência necessária para manter constante a temperatura de reação do resíduo i

PP_{jt} = preço do óleo j no período t

PRE = Potência perdida pelo reator

PR_i = potência perdida na reação química com o resíduo i

QP_{jt} = quantidade de produto j gerado no período t

QR_{it} = quantidade de resíduo i processado no período t

R = número de resíduos/coeficiente de correlação

T = número de períodos de tempo

t = período de tempo

T_{∞} = temperatura ambiente

TA_i = temperatura de alimentação do resíduo i

T_c = tempo de ciclo

TG_i = taxa de geração do resíduo i

t_i = tempo de processamento de uma batelada do resíduo i

$(t_i)_k$ = tempo de processamento da batelada k do resíduo i

T_{li} = temperatura inicial do resíduo i

TM_i = média da temperatura para manter a reação com resíduo i

$Tmax_i$ = temperatura máxima para processar o resíduo i

$tmax_i$ = tempo máximo para processar o resíduo i

$Tmin_i$ = temperatura mínima para processar o resíduo i

$tmin_i$ = tempo mínimo para processar o resíduo i

$TNEE_i$ = temperatura do resíduo i no novo estado estacionário

to_i = tempo para iniciar a reação com o resíduo i

T_R = temperatura da reação

T_{RE} = Temperatura do reator

T_{Ri} = temperatura de reação do resíduo i

t_R = tempo da reação

t_{Ri} = tempo de reação do resíduo i

t_s = tempo de *setup*

U = coeficiente global de troca térmica

x^* = vetor das variáveis de projeto no ponto ótimo

x_i = variáveis de projeto/rendimento de óleo a partir do resíduo i

Letras gregas:

α = constante da função *crossover*

$$\Delta T = T_R - T_\infty$$

ΔT_T = variação da temperatura da reação do início do aquecimento até temperatura da reação

$$\Delta T_i = T_{Ri} - T_\infty$$

σ = variância da população/variância explicada

τ_j = tempo de processamento do estágio j

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo é apresentada a motivação para a escolha do tema abordado, a organização da tese e uma breve descrição sobre as atividades desenvolvidas, incluindo os principais conceitos e fundamentos sobre a pirólise, administração da produção e otimização.

1.1 Motivação

Segundo o JORNAL CORREIO DO POVO (2002), o Brasil produz cerca de 2,9 milhões de toneladas de resíduos industriais perigosos por ano, porém somente 22% recebem tratamento adequado, sendo o restante depositado indevidamente em “lixões”.

As informações deste parágrafo são baseadas no *site* do Ministério do Meio Ambiente, segundo o qual dados da Pesquisa Industrial Anual, realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), mostram que as regiões Sul e Sudeste possuem os estados mais industrializados do País, sendo eles os maiores geradores de resíduos sólidos industriais. De acordo com a Companhia de Tecnologia de Saneamento Básico (CETESB), a cada ano são geradas cerca de 2,5 milhões de toneladas de resíduos industriais, perigosos e não perigosos, no Estado de São Paulo. No Rio Grande do Sul, cerca de 300 mil toneladas de resíduos sólidos industriais são gerados por ano, sendo 63,6% resíduos considerados perigosos.

Caxias do Sul, por constituir o segundo e terceiro maior pólo metal-mecânico do Estado e do Brasil, respectivamente, foi escolhida como a região de estudo deste trabalho, possuindo 5865 indústrias, destacando-se por apresentar grandes quantidades e alto passivo ambiental com resíduos industriais de plásticos e borras de tintas, tanto em volume gerado quanto pelo seu grau de periculosidade. Os resíduos escolhidos para estudo foram o polipropileno, a acrilonitrila butadieno estireno e a “borra de tinta” de origem poliuretânica, aqui denominados de PP, ABS, e NR5, respectivamente.

Dos resíduos atualmente tratados, os dois principais destinos são: a incineração e aterros industriais, acarretando sérios riscos sociais e ambientais e, por isso faz-se necessário a busca de novas formas para racionalizar a utilização destes resíduos, sendo a pirólise uma destas alternativas. Entretanto, um estudo detalhado, envolvendo viabilidade técnica e econômica, bem como planejamento da produção e supervisão adequada do processo é de fundamental importância para garantir o sucesso de uma planta industrial de pirólise multiprodutos.

A utilização de Algoritmos Genéticos como estratégia de solução, deve-se ao sucesso de seu uso como método de pesquisa operacional em diversos problemas de larga escala, a sua capacidade de determinar simultaneamente o planejamento de produção, *scheduling* e condições operacionais garantindo solução sempre viável, além da curiosidade científica de utilizar os princípios fundamentais da genética aliados à base da teoria da evolução como alternativa para a solução de um problema ambiental.

1.2 Pirólise

A pirólise é um método de reciclagem terciária, que consiste na reação de degradação térmica na ausência, ou com mínimo de oxigênio, de forma a agregar valor a produtos potencialmente poluidores. A reação de pirólise gera três fases, uma fase gasosa atóxica constituída de compostos orgânicos voláteis (VOCs) com alto poder calorífico, uma fase líquida

com características de óleos combustíveis e quantidade mínima de sólidos que pode ser aproveitada como carga em indústrias como a da construção civil, entre outros.

As reações de pirólise foram conduzidas em um reator de bancada operando em batelada, projetado e montado no Laboratório de Reatores da Universidade de Caxias do Sul. O sistema é composto ainda de um separador *flash*, um sistema de controle de temperatura, utilizando redes neuronais e um cromatógrafo a gás com integrador eletrônico acoplado. As condições operacionais estudadas foram temperatura na faixa de 450 a 650° C e tempo de batelada entre 5 e 90 minutos.

Um estudo de viabilidade técnica do processo de pirólise é fundamental já que existem restrições, por parte de órgãos ambientais, quanto ao uso de processos térmicos de reciclagem, principalmente no que se refere à formação e à liberação para a atmosfera, de gases tóxicos. Sendo assim, os produtos gasosos e líquidos são analisados por cromatografia gasosa e a fase sólida é caracterizada quanto aos metais, por raio X e, quanto a hidrocarbonetos não reagidos, por análise de infra-vermelho.

A viabilidade econômica de uma planta comercial de pirólise de resíduos sólidos industriais é determinada em função dos seguintes fatores: o tipo de resíduo industrial, o tipo de combustível produzido, a escolha e capacidade dos equipamentos que compõem a linha de produção, o valor comercial dos resíduos processados e dos combustíveis produzidos. Além destes, por ser a pirólise um tratamento térmico que consome considerável quantidade de energia, é necessário utilizar os produtos gerados como forma de integração energética total ou parcial, minimizando desta forma os custos do processo. A medida de rentabilidade utilizada para análise do investimento é a taxa de retorno sobre o investimento (DOUGLAS, 2001).

1.3 Administração da Produção

A administração da produção de uma planta de pirólise multiprodutos consiste na atualização do sequenciamento da produção e dos *set points* de temperatura e tempo de batelada, para atingir os objetivos do planejamento de produção. Esses objetivos, dentro de uma empresa de processos típica, consistem em responder às seguintes perguntas principais: o que, quando e quanto comprar e produzir matérias primas e produtos, respectivamente, e em quais equipamentos produzir. Essas questões não são respondidas uma única vez para uma produção diária particular, mas repetidamente quando a demanda e o preço dos produtos e matérias-primas variam, sendo necessária uma forma sistemática para respondê-las, já que boas respostas para estas questões, certamente significam um aumento do lucro da empresa.

A administração da produção é composta especialmente por três categorias:

- a) Sistemas de planejamento – responsável pela coordenação sobre uma escala de tempo ‘longa’ de semanas ou meses (e eventualmente anos).
- b) Sistemas de *scheduling* – definem as atividades específicas a serem conduzidas sobre uma escala de tempo de dias até semanas.
- c) Sistemas de controle de processos – responsável pela execução em tempo real sobre horizontes de tempo de segundos até minutos.

Os componentes chaves desses três sistemas dividem-se em dois grupos: aqueles cujas funções estão diretamente relacionadas com as operações de produção, utilizando os dados do processo; e aqueles cujas funções, embora tenham impacto nas decisões tomadas, não focalizam o processo de produção. Os elementos do primeiro grupo incluem o planejamento estratégico, o planejamento tático, o *scheduling*, o controle supervisorio e a aquisição e análise de dados do processo. Os elementos que constituem o segundo grupo são: a previsão de vendas, a gestão de contas, a administração financeira, a administração de material e os setores de vendas e transportes. Portanto, um bom modelo para a função lucro deve incluir os principais elementos

citados acima. Neste estudo é utilizado um modelo para o planejamento da produção de uma planta batelada capaz de processar vários tipos de resíduos sólidos industriais em uma linha simples de produção em um único estágio e processador. A maximização desta função deve ser realizada através de um método de otimização, que resulte na determinação simultânea do planejamento de produção, sequenciamento de produção e “*set points*” de temperatura e tempo de batelada. Para tanto adotou-se o método de Algoritmos Genéticos para um horizonte de tempo de trinta dias. As demandas de matérias primas e produtos, tempos e temperaturas de processamento foram considerados flexíveis dentro de uma faixa de valores entre limites mínimos e máximos.

1.4 A Pesquisa Operacional (Otimização)

A pesquisa operacional é definida como um método estatístico para a tomada da melhor decisão, ou decisão ótima, envolvendo as operações de um sistema organizacional. Assim, ela está diretamente ligada ao conceito de otimização, uma vez que consiste em determinar *o mais eficiente possível* conjunto de ações para conduzir e coordenar as operações ou atividades dentro de uma organização. A pesquisa operacional aplica-se a problemas caracterizados pela alocação de recursos limitados, como por exemplo, o controle de inventário, o gerenciamento de pessoal, a localização de plantas, o problema de transporte e o planejamento e sequenciamento da produção, sendo suas principais fases as seguintes:

- a) Formulação do problema;
- b) Construção de um modelo matemático representativo do sistema em estudo;
- c) Obtenção de uma solução a partir do modelo.

A pesquisa operacional é um campo de estudo dividido em duas grandes áreas: uma é a programação matemática, que focaliza principalmente problemas e métodos determinísticos, fazendo uso de gradientes funcionais e operações matriciais; e a outra área trata de sistemas que

envolvem probabilidades e pesquisa estocástica. Dentro desta última se encontra a inteligência artificial, que busca criar sistemas inteligentes que reproduzam aspectos do comportamento humano, tais como percepção, raciocínio, adaptação e aprendizado. Ela pode ser dividida em subáreas conforme mostrado na Figura 1.1.

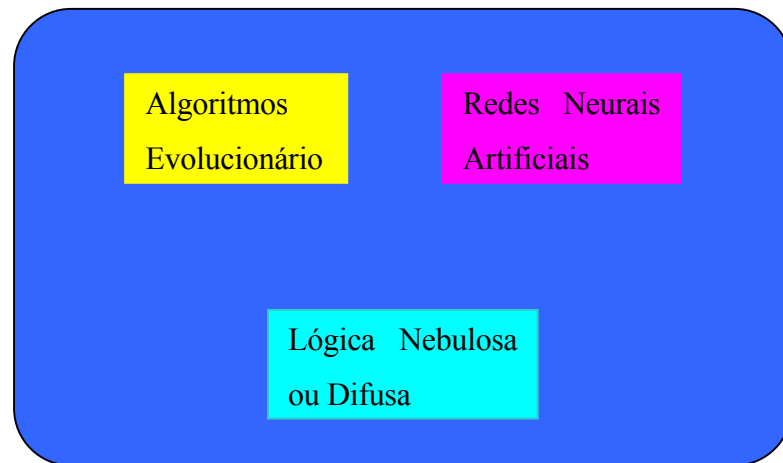


Figura 1-1 Sub-áreas da inteligência artificial

Os algoritmos evolucionários constituem uma classe que inclui os ramos de pesquisa que aplicam os mecanismos de sistemas naturais para sistemas artificiais, através de computador, onde a evolução é o principal elemento. Uma variedade de métodos evolucionários tem sido proposta. Os principais são:

- a) Algoritmos Genéticos
- b) Programação evolucionária
- c) Estratégias evolucionárias
- d) Programação genética
- e) Estratégia de colônia

Segundo CASTRO (2001), estes métodos evolucionários podem ser resumidamente descritos conforme apresentado a seguir.

1.4.1 Algoritmos Genéticos

São métodos de pesquisa estocástica ou de otimização que utilizam a teorias da evolução e da seleção natural para resolver um problema dentro de um espaço de solução complexo.

1.4.2 Programação Evolucionária

Originalmente foi concebida por Lawrence J. Fogel em 1960, apud CASTRO (2001), como uma estratégia de otimização estocástica similar aos Algoritmos Genéticos. No entanto, enfatizam o relacionamento entre os genitores e seus descendentes ao invés de tentar emular operadores genéticos específicos observados na natureza.

A Programação Evolucionária também opera com populações, mas apenas diferentes níveis de mutação são efetuados sobre os genitores na criação de novas soluções. O tamanho da população não necessita ser mantido constante, como também não é fixado um número de descendentes por genitor. Trabalham com representações mais flexíveis que as empregadas pelos Algoritmos Genéticos por não efetuarem recombinações.

1.4.3 Estratégias Evolucionárias

Foram concebidas para tratarem problemas técnicos de otimização e quase que exclusivamente empregadas em engenharia como alternativa aos métodos convencionais. Operam com cromossomos na forma de vetores de números reais e originalmente na proporção (1+1), isto é, cada genitor gera um herdeiro por geração, normalmente por mutações distribuídas. Caso este descendente seja melhor que seu genitor ele lhe toma o lugar.

Atualmente estas estratégias foram extendidas para as proporções $(m+1)$ e $(m+n)$, além de terem tido operadores de recombinação introduzidos no seu processo evolutivo.

1.4.4 Programação Genética

Operam sobre representações de trechos de programas na forma de árvores, de modo que possam ser combinados para gerarem novos trechos de programas mais complexos. Usualmente é utilizada a linguagem *Lisp* pela facilidade de sua representação, como mostrado em <http://www.kneehighs.com/related.html> (2003).

Os programas na população são compostos de elementos ou conjuntos fixos de símbolos, devidamente selecionados por serem apropriados ao domínio do problema a ser resolvido.

Normalmente, ênfase maior é dada às operações de recombinação, através de uma seleção aleatória de sub-árvores e posteriores trocas dos indivíduos. Os indivíduos são selecionados conforme suas aptidões.

1.4.5 Estratégia de Colônia

A Estratégia de Colônia é inspirada no comportamento de enxames, isto é, no comportamento coletivo de colônias de insetos, como por exemplo, colônia de formigas, ou em sociedades de outros animais. Opera com a idéia da comunicação indireta explorada pelas sociedades de insetos, que formam algoritmos distribuídos de multi-agentes, CASTRO (2001).

Esta estratégia está sendo aplicada a vários problemas de otimização de cadeias de telecomunicações, distribuição de tarefas e principalmente em problemas de otimização combinatória.

1.5 Organização da Tese

No Capítulo 2 é definido o objetivo desta tese, com breve descrição dos objetivos geral e específicos.

No Capítulo 3 é apresentado o “estado da arte” do processo de pirólise de resíduos sólidos industriais de plásticos e borra de tinta. Esse sistema é definido como uma planta multiprodutos, sendo apresentada uma revisão bibliográfica sobre a modelagem de plantas multiprodutos, incluindo o planejamento e *scheduling* de produção e um histórico do método de otimização de processos com Algoritmos Genéticos aplicados a problemas de larga escala, discutindo a possibilidade de sua aplicação para solução deste tipo de sistema.

No Capítulo 4 são discutidos os princípios fundamentais da otimização e do método de Algoritmos Genéticos mostrando as estratégias empregadas nesse método que o tornam atraente e promissor na resolução de problemas, com ênfase no Algoritmo Genético em codificação real.

No Capítulo 5 é apresentada a metodologia usada para a otimização de uma planta batelada multiprodutos, consistindo de 3 partes principais: a) aquisição *on line* de dados, através de um aparato experimental montado em escala de bancada; b) levantamento de informações, em campo, sobre a região de inserção da planta de pirólise e; c) desenvolvimento de um código computacional para estudos de otimização.

Os Capítulos 6 e 7 são uma extensão do Capítulo 5. No Capítulo 6 é aplicada a metodologia adotada no Capítulo 5 para a região de Caxias do Sul, e no Capítulo 7 são apresentados os resultados desse estudo de caso.

No Capítulo 8 são discutidos as contribuições do trabalho realizado, e apresenta as conclusões pertinentes ao desenvolvimento do mesmo.

Capítulo 2

Objetivos da Tese

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia que permita otimizar a operação de um reator de pirólise multiprodutos para resíduos sólidos industriais.

2.2 Objetivos Específicos

1 - Estudar a região de inserção da planta de pirólise: realizar extensa pesquisa bibliográfica e *in loco*, das características sócio-econômicas e geográficas da região onde se pretende montar a planta de pirólise, visando inventariar os resíduos sólidos industriais para a determinação dos principais tipos de resíduos, da taxa de geração e da capacidade da planta a ser construída.

2 - Estudar a viabilidade técnica e econômica dos produtos gerados: é necessário caracterizar os produtos líquidos, sólidos e gasosos da pirólise, tanto para atender à legislação ambiental vigente, quanto para verificar o poder econômico de cada uma dessas fases.

3 - Modelar o reator de pirólise: com a aquisição de parâmetros funcionais tais como: temperatura, tempo de reação, massa e composição dos produtos da reação, pretende-se desenvolver modelos para a obtenção do rendimento de produtos e da energia envolvida na reação em batelada.

4 - Estudar a performance dos Algoritmos Genéticos como método de solução deste tipo de problema de otimização: analisar a performance do método de Algoritmos Genéticos, aplicado a um caso real, para obter simultaneamente uma política de planejamento de produção ótima e um sequenciamento e condições operacionais do processo viáveis, obedecendo às restrições de tempo, disponibilidade de matérias primas e demanda de produtos.

5 - Analisar o investimento de capital para a concepção de uma planta industrial de pirólise: aplicar um modelo econômico para o investimento total do capital aplicado em um reator de pirólise industrial, calculando a taxa de retorno sobre o investimento.

Os capítulos seguintes apresentam as etapas envolvidas para se atingir os objetivos propostos, iniciando (no próximo capítulo) com o estado da arte do processo de pirólise de resíduos sólidos industriais de plásticos e borra de tinta, passando-se a modelagem desse sistema batelada multiprodutos e finalizando com o método de Algoritmos Genéticos aplicado a problemas de larga escala.

Capítulo 3

O Estado da Arte dos Temas da Tese

Neste capítulo define-se o processo de pirólise, seu mecanismo de reação e aplicação, tanto como fonte geradora de combustível como na reciclagem de resíduos poliméricos industriais, especialmente de plásticos e de tintas. Quanto aos resíduos sólidos industriais, são apresentadas as formas de classificação e a legislação vigente. A análise da viabilidade econômica do processo é realizada considerando fatores tais como o tipo de resíduo industrial, o tipo de combustível produzido, os equipamentos que compõem uma planta de pirólise e os modelos que permitem determinar o investimento do capital. A pirólise é comparada a uma planta batelada multiprodutos com um estágio e um processador, sendo sua modelagem representada em função das diversas operações comumente envolvidas neste tipo de planta. Ênfase maior é dada aos modelos envolvendo as funções diretamente ligadas à manufatura da planta, isto é, modelos envolvendo planejamento de produção, *scheduling* e as condições operacionais da planta. Em um último item, é descrito um método de solução para esses modelos usando Algoritmos Genéticos, e a experiência de utilização desse método para problemas de larga escala.

3.1 Reciclagem de Resíduos Poliméricos

A maioria dos resíduos sólidos poliméricos apresenta um tempo de decomposição elevado para ser absorvido pela natureza, existindo uma variedade de tecnologias que são utilizadas para a sua reciclagem. Segundo publicação da BOLSA DE RECICLAGEM (2001) do Sistema da Fundação das Indústrias do Estado do Paraná (FIEP), as formas de reciclagem podem ser classificadas em mecânica, energética e química, conforme descrito abaixo.

A reciclagem mecânica consiste na conversão dos resíduos poliméricos pós-consumo em grânulos que podem ser reutilizados na obtenção de outros produtos como sacos de lixo, solados de sapato, pisos, mangueiras, embalagens não alimentícias e outros. Este tipo de processo passa pelas seguintes etapas: separação, moagem, lavagem, aglutinação e extrusão.

A reciclagem energética é a recuperação da energia contida nos resíduos através de processos térmicos. A reciclagem energética distingue-se da incineração por utilizar os resíduos como fonte de combustível na geração de energia. Além da economia e da recuperação de energia, com este tipo de reciclagem ocorre ainda uma redução de 70 a 99% da massa do material alimentado.

O objetivo da reciclagem química é a recuperação dos componentes químicos industriais para reutilizá-los como produtos químicos para a produção de novos produtos. Entre os processos de reciclagem química existentes destacam-se a *hidrogenação*, onde ocorre a quebra de cadeias mediante o tratamento com hidrogênio e calor, gerando produtos capazes de serem processados em refinarias; a *gaseificação* em que os resíduos são aquecidos com ar ou oxigênio, gerando-se gases de síntese contendo monóxido de carbono e hidrogênio; a *quimólise* que consiste na quebra parcial ou total dos plásticos em monômeros e a *pirólise*, que é a quebra das moléculas pela ação do calor na ausência de oxigênio, de forma a obter produtos de valor no mercado.

O INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS–IPT (1995) classifica a reciclagem nos seguintes três tipos

Reciclagem primária: é a recuperação de resíduos efetuada na própria indústria geradora ou por empresas transformadoras. Consiste na conversão de resíduos, por tecnologias convencionais de processamento, em produtos com características de desempenho equivalentes às daqueles produtos fabricados a partir de matéria-prima virgem.

Reciclagem secundária: é a conversão de resíduos de materiais que provêm de “lixões”, usinas de compostagem, sistemas de coleta seletiva, sucatas, etc. São constituídos pelos mais diferentes tipos de materiais e resinas, o que exige uma boa separação para o reaproveitamento.

Reciclagem terciária: é a conversão de resíduos em produtos químicos e combustíveis através de processos termoquímicos (pirólise e conversão catalítica). Através destes processos os polímeros são convertidos em substâncias como gases e óleos combustíveis.

3.2 O Processo de Pirólise

Para MORRISON e BOYD (1993), a decomposição de um composto por ação exclusiva do calor denomina-se pirólise. Esta palavra, que deriva do grego *pyr* (fogo) e *lysis* (desprendimento), tem para os químicos o significado de “decomposição pelo calor”, fazendo uma analogia com hidrólise, “decomposição pela água”.

A pirólise é uma decomposição térmica na ausência ou com o mínimo de oxigênio, com geração simultânea de líquidos e gases. Esses produtos podem ser usados para abastecer energeticamente o próprio processo ou serem comercializados como produtos químicos ou combustíveis. As principais vantagens da pirólise sobre a combustão são: economia na lavagem

de gases, uma vez que a pirólise produz menor quantidade de gases, e a ausência de compostos oxigenados, muitas vezes tóxicos. Porém uma dificuldade encontrada com a pirólise, é o fato de que para vários polímeros, considerável quantidade de energia é necessária para quebrar as macromoléculas (BRANDRUP, 1996), sendo desejável a utilização da energia gerada no processo para compensar total ou parcialmente os custos energéticos.

No início do século XX, mais precisamente em 1909, um eminente cientista, C. Caratheodory, revisando os estudos de Max Planck, reestruturou a Termodinâmica estabelecendo um importante conceito, a Parede Adiabática, que trata da transferência de calor através de substâncias isolantes. A compreensão desta teoria permitiu a construção de sistemas térmicos mais eficientes como os reatores, as caldeiras, etc., incluindo-se a pirólise neste processo, pois seu elemento principal é um reator (LIMA, 1991).

WINKLER (1926) desenvolveu as primeiras experiências práticas com reatores pirolíticos na Alemanha. No fim da Segunda Guerra Mundial, os alemães, utilizando os estudos de Winkler, obtiveram de resíduos domésticos, gases combustíveis como o metano e o isobutano, usando-os para mover suas frotas.

Nos Estados Unidos, as pesquisas com reatores pirolíticos começaram em 1929 com o desenvolvimento de um protótipo para carbonização de carvão. Aproveitando a experiência, introduziram no reator, resíduos de pneus, sendo este o primeiro tipo de resíduo a ser pirolisado. Gás com alto poder calorífico, óleo e resíduos sólidos foram obtidos neste experimento. Com resultados iniciais proveitosos, novos produtos foram introduzidos no reator como plásticos e resíduos de curtumes (LIMA, 1991).

Diversos estudos sobre pirólise podem ser encontrados na literatura para diferentes tipos de alimentação, especialmente a partir de 1973 devido à crise do petróleo que desencadeou a elevação do preço do óleo cru e de produtos petroquímicos. Os processos pirolíticos mais pesquisados são aqueles destinados à obtenção de combustível derivado de resíduo sólido

municipal (RDF), revisados por LIMA (1991) e recentemente por CAPUTO e PELAGAGGE (2003) e de resíduo polimérico industrial com vários registros na literatura, alguns deles descritos no item seguinte. Recentemente, tem ocorrido um crescente interesse na aplicação da pirólise para a conversão de biomassa para bio-óleo (CHEN *et al.*, 2003a, CHEN *et al.*, 2003b, MCKENDRY, 2002, MOUSQUÈS *et al.*, 2001, JANSE *et al.*, 2000, ISLAM *et al.*, 1999, ANI e ISLAM, 2000 e CHIANG *et al.*, 2000).

3.3 Pirólise de Resíduos Poliméricos

Processos pirolíticos vêm sendo pesquisados como a reciclagem terciária que se refere à despolimerização e/ou decomposição e reutilização dos monômeros e oligômeros formados, a partir de polímeros presentes nos resíduos sólidos domésticos e industriais. O principal objetivo da reciclagem terciária é recuperar valiosos produtos químicos como os monômeros originais. Um exemplo disso é o estudo realizado pelo químico Paul Willians, da Universidade de Leeds – Inglaterra, citado por LOVETT *et al.* (1997) que usa a pirólise para reciclar os pneus, transformando-os em petróleo e outras substâncias úteis na indústria química. O procedimento consiste em aquecer a borracha em atmosfera inerte de nitrogênio. Esta se decompõe em alta temperatura, produzindo óleo combustível, carbono e aço. Os pneus podem render até 60% do seu peso em petróleo. Entretanto, a qualidade do óleo obtido na pirólise era ainda muito baixa para ter um valor comercial. Atualmente, a Petrobrás de São Mateus do Sul no Paraná utiliza o processo Petrosix, que consiste na pirólise de xisto e pneus, onde o óleo recuperado é de boa qualidade sendo utilizado como óleo combustível e como aditivo de asfaltos. O negro de fumo gerado tem sido aplicado como carga ou modificador de asfaltos especiais além de insumo para termelétricas. As emissões ambientais da queima de óleo e gás de pirólise de xisto e pneus são comparáveis às de outros processos de combustão de óleos combustíveis convencionais. Portanto, num futuro próximo, os 700 milhões de pneus “carecas” jogados fora anualmente no

mundo todo não precisarão mais serem encaminhados ao depósito de lixo, podendo servir de combustível para postos de gasolina e indústrias (NOVICKI, 2000).

No que se refere a resíduos plásticos, a produção de plástico inicialmente produziu resinas fenólicas e poliestireno, cujos resíduos tinham um único destino que eram os aterros a céu aberto e que não consistiam num sério problema social, ecológico ou econômico. Durante a Segunda Guerra Mundial, o excedente desses resíduos resultou numa preocupação constante, incentivando o desenvolvimento dos processos de reutilização. Dentre esses processos, destacam-se: a incineração, a degradação química, a moagem e reutilização e a pirólise (FIGUEIREDO, 1991). Em temperaturas acima de 400°C, uma cadeia linear de polímeros é tão instável que se decompõe espontaneamente em pequenas moléculas depois de um certo período de tempo, mesmo sem a penetração do ar, de outros gases reativos ou de substâncias com efeito catalítico. Por isso a pirólise é realizada acima desta temperatura. Em plantas de processos pirolíticos, as altas temperaturas, produzem uma grande proporção de óleos valiosos (MENGUES, 1993).

Consequentemente, não é uma combustão que ocorre, mas um conjunto complexo de reações que dependem dos plásticos envolvidos e da natureza precisa do processo pirolítico usado. Os caminhos possíveis da reação são:

- a) A decomposição em monômeros;
- b) Fragmentação das cadeias principais em outras de tamanho variável;
- c) Decomposição e fragmentação simultâneas;
- d) Eliminação de inorgânicos simples;
- e) Eliminação de cadeias laterais.

Essas interações merecem um estudo mais detalhado, por não serem bem entendidas ou quantificadas. A cinética de pirólise de polímeros é importante para prever a formação de compostos líquidos e gasosos a partir de resíduos poliméricos. Um método comum para determinar parâmetros cinéticos é ajustar modelos cinéticos a curvas de conversão obtidas a partir de experimentos isotérmicos ou dinâmicos (ADRIAN *et al.*, 2003, DADVAND *et al.*, 1999, CONESA e FONT, 1999, BALLICE e REIMERT, 2002a, e BALLICE e REIMERT, 2002b). Entretanto, BOCKHORN *et al.*(1999) provaram que havia um desvio considerável nos valores dos parâmetros cinéticos obtidos por esse método devido à efeitos de transporte e mecanismos de reação mais complexos. Mecanismos mais detalhados para as reações de pirólise, considerando uma distribuição de peso molecular resultaram em um sistema de equações diferenciais de alto grau. Os principais métodos desenvolvidos são o procedimento *lumping* (MARONGIU *et al.*, 2003 e RANZI *et al.*, 2001), métodos do pesos discreto de Galerkin e método dos momentos, citados por BOCKHORN (1999a).

No processo de pirólise, os diferentes componentes do material polimérico atingem suas temperaturas de decomposição e começam a liberar uma ou mais das seguintes substâncias:

- a) Gases combustíveis como alcanos, alcenos, formaldeído e monóxido de carbono;
- b) Gases não combustíveis, como vapor d'água e dióxido de carbono;
- c) Gases corrosivos como cloreto de hidrogênio e brometo de hidrogênio;
- d) Líquidos, geralmente fragmentos das cadeias poliméricas;
- e) Partículas sólidas como fuligem, fibra de vidro e cargas minerais;
- f) Radicais livres.

Na maioria dos casos, a pirólise ocorre por um mecanismo de radicais livres, iniciado por traços de oxigênio ou outras impurezas oxidantes, que são incorporadas pelos polímeros durante seu processamento. Segundo GALLO e AGNELLI (1998), um possível mecanismo de pirólise para as poliolefinas pode ser visualizado nas reações (3.1) a (3.4).



Na presença de oxigênio em concentração suficiente, as reações (3.2) e (3.3) formam um ciclo fechado, que acelera o processo, dado que as mesmas ocorrem a velocidades muito superiores a da reação (3.1). O resultado final é a formação de um grande número de diferentes espécies químicas, tais como hidrocarbonetos de baixa massa molar e os radicais livres altamente reativos $\text{H}\bullet$ (hidrogênio) e $\text{HO}\bullet$ (hidroxila).

A pirólise pode ser usada tanto para polímeros termoplásticos como para termorrígidos. Nesse sentido, ela surge como uma possível alternativa para a reciclagem terciária de plásticos industriais.

Plásticos são artefatos fabricados a partir de resinas (polímeros) sintéticas, derivadas do petróleo. São divididos em duas categorias importantes: termoplásticos e termofixos. Os termofixos são plásticos que uma vez moldados por um dos processos usuais de transformação, não podem mais sofrer novos ciclos de processamento. Como exemplo podem-se citar poliuretanos (PU) e o etileno acetato de vinila (EVA). Os termoplásticos são materiais que podem ser reprocessados várias vezes pelo mesmo ou por outro processo de transformação. Exemplos são: polietileno (PE), poliestireno (PS), polipropileno (PP) e outros.

A busca por processos de reciclagem de plásticos iniciou-se com a intensa utilização desses materiais na indústria automobilística, gerando crescente acúmulo de resíduos.

KAMINSKY (1991) estudou detalhadamente, no processo de pirólise, a presença de cloretos em polímeros, como por exemplo, no caso do Poli Cloreto de Vinila (PVC) que libera cloreto de hidrogênio causando problemas de corrosão e que pode catalisar reações de polimerização e condensação, assim como outros produtos pirolíticos. Portanto, cloretos devem ser eliminados antes de submeter resíduos plásticos à incineradores ou a outros processos térmicos como a gaseificação e a pirólise. BOCKHORN *et al.* (1999b) mostraram que à 330°C ocorre remoção do cloreto de hidrogênio do PVC. Os produtos da degradação do PVC também foram estudados por KULESZA e GERMAN (2003).

A pirólise de diversos compósitos de resíduos plásticos tem sido estudada quanto ao rendimento de óleo, gás e sólido e também realizada caracterização detalhada da composição de seus derivados. Estudos mais recentes foram realizados por CUNLIFFE *et al.* (2003), que analisaram os resíduos de poliéster, resina fenólica, epóxi, viniléster, polipropileno e polietileno, e THALLADA *et al.* (2003) que estudaram a degradação térmica de outras misturas de resíduos plásticos contendo polietileno, polipropileno, poliestireno, PVC, além da comparação destes com resíduos sólidos municipais.

Soma-se aos resíduos citados acima, um resíduo industrialmente denominado borra de tinta, proveniente de indústrias que utilizam processos de pintura com tinta líquida. A borra de tinta é a tinta coletada na água de lavagem de cabines de pintura. Este problema é crítico na região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, devido à presença de dois grandes pólos industriais: Metal – Mecânico e Moveleiro.

Poucos trabalhos têm sido publicados na literatura e referem-se à caracterização, disposição e principalmente usos da borra de tinta. SEBASTIAN *et al.* (1988) caracterizaram alguns tipos de resíduos perigosos de indústrias metalúrgicas utilizando Análise Térmica

Diferencial (DTA), e ERDMAN e JOHNSON (1988) usaram um trocador de calor indireto para reduzir o volume de resíduo de tinta, devido à sua dificuldade de manipulação. MITCHELL *et al.* (1989) utilizaram polímeros orgânicos para redução de resíduos perigosos de sistemas de tratamento de efluentes de processos que operam com pintura em cabines.

O Laboratório de Pesquisas da Ford em Dearborn, Michigan (EUA), tem estudado intensivamente aplicações para a borra de tinta destacando-se o trabalho de KIM (1996) que utilizou a borra de tinta para adsorção de alguns tipos de solventes de tintas em substituição ao sistema de carvão ativado. Foram apresentados resultados de reações de pirólise para ativação da borra e de experimentos de adsorção. Os mesmos autores desenvolveram um sistema de lodo ativado para degradação biológica de solventes encontrados em tintas utilizadas no processo de pintura em cabines em substituição ao processo de adsorção com carvão ativado. NAKOUZI *et al.* (1998) propuseram uma alternativa econômica para utilização de borra de tinta, convertendo-a em um compósito cerâmico, por pirólise, sob atmosfera de nitrogênio com posterior aplicação deste material como reforço em componentes plásticos.

Atualmente, na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, o destino final da borra de tinta é sua simples armazenagem em tambores dispostos em áreas controladas pelos órgãos competentes. Entretanto, o crescimento acelerado destas áreas torna-se um grave problema social e ambiental devido à sua aproximação cada vez maior com áreas habitadas, causando riscos à saúde da população, por tratar-se de um resíduo constituído por compostos orgânicos voláteis e tóxicos, além de existir a possibilidade de contaminação de recursos hídricos. Também, a disposição de resíduos nestas áreas é onerosa para as empresas devido ao grande volume gerado, justificando o desenvolvimento de alternativas para dar um destino mais nobre a esses resíduos.

A montagem de uma Planta piloto para reciclagem de resíduos sólidos industriais é uma opção tanto para resíduos de plásticos quanto de tintas, e o processamento de diversos tipos de

resíduos leva-nos a optar pelo uso de um sistema multipropósito com operação em batelada, onde os vários resíduos podem ser pirolisados no mesmo equipamento.

3.4 Classificação de Resíduos Sólidos Industriais:

Segundo a norma NBR 10004, os resíduos sólidos industriais são classificados como:

Classe I – Perigosos. São resíduos que apresentam periculosidade em função das propriedades físicas, químicas ou infecto contagiosas, ou características de corrosividade, reatividade, inflamabilidade, toxicidade e patogenicidade;

Classe II – Não Inertes. São os resíduos que não se enquadram na classe III, mas podem ter propriedades de combustibilidade, biodegradabilidade e solubilidade em água;

Classe III – Inertes.

A grande parte dos resíduos classes II e III são dispostos em aterros industriais, porém, alguns resíduos classe I, possuem características de toxidade, e periculosidade que inviabilizam a sua disposição nesses aterros, necessitando de alternativas de tratamento, sendo os mais indicados a incineração, o co-processamento em indústria cimenteira e a pirólise, já descrita no item 3.2 (FUNDAÇÃO AMBIENTAL SUL, 1996).

Incineração: A incineração é considerada uma forma de disposição final e constitui-se num método de tratamento que se utiliza da decomposição térmica, com o objetivo de tornar um resíduo menos volumoso e menos tóxico.

As unidades de incineração variam desde instalações pequenas, projetadas e dimensionadas para um resíduo específico, até grandes instalações multipropósitos, para incinerar resíduos de diferentes fontes. No caso de materiais tóxicos e perigosos, estas

instalações requerem equipamentos adicionais de controle de poluição do ar, com conseqüente demanda de maiores investimentos.

As principais características dos resíduos que apresentam maior potencial para o processo de incineração são :

- a) resíduos orgânicos constituídos basicamente de carbono, hidrogênio e/ou oxigênio;
- b) resíduos que contêm carbono, hidrogênio, cloro com teor inferior a 30% em peso e/ou oxigênio;
- c) resíduos que apresentam seu poder calorífico inferior (PCI) maior que 4.700 Kcal/Kg, não necessitando de combustível auxiliar para queima.

As características dos resíduos e seu comportamento durante a combustão é que determinam como eles devem ser misturados, estocados e introduzidos na zona de queima. Alguns líquidos, com baixo ponto de fulgor, são facilmente oxidados enquanto outros, incapazes de manter a combustão, devem ser introduzidos através de uma corrente de gás quente ou aspergidos diretamente sobre a chama.

Os incineradores trabalham na faixa de 1200 a 1400°C com o tempo de detenção entre 0,2 a 0,5 segundos, podendo chegar em alguns casos até a 2 segundos.

Co-processamento: por definição, é a técnica que permite a queima de resíduos em fornos de cimento mediante dois critérios básicos : reaproveitamento de energia, para que o material seja utilizado como substituto ao combustível, ou reaproveitamento como substituto da matéria-prima, de forma que o resíduo a ser eliminado apresente características similares às dos componentes normalmente empregados na produção de clínquer .

O co-processamento é uma técnica de disposição final de resíduos que, de forma semelhante a incineração, utiliza-se de altas temperaturas para oxidar os resíduos. Algumas

particularidades desta técnica reside no fato de ela não gerar cinzas, pois as mesmas ficam agregadas no cimento, e no fato de ter um tempo de detenção maior.

No forno de produção de clínquer, onde os resíduos são destruídos, a temperatura na entrada é da ordem de 1200°C, sendo que na chamada zona do maçarico a temperatura chega até a 2000°C. As altas temperaturas no fornos, aliadas ao tempo de detenção e a alta turbulência do interior dos equipamentos, resultam na destruição de quase toda a carga orgânica e, como citado acima, as cinzas, que basicamente são formadas pela parte inorgânica, ficam incorporadas ao *clínquer*.

Pela técnica do co-processamento é proibida a queima de organoclorados, lixo urbano, radioativo e hospitalar.

3.5 Análise Econômica de uma Planta de Pirólise de Resíduos Sólidos Industriais

As tecnologias de tratamento de resíduos para a recuperação de energia representam uma interessante alternativa no tratamento de resíduos sólidos industriais. A incineração é o método mais usado no gerenciamento desses resíduos. Entretanto, os altos custos para controle de poluição de incineradores, o alto conteúdo de energia dos polímeros, bem como a composição química de vários polímeros, especialmente aqueles contendo cloro, estão demandando para tratamentos alternativos. A pirólise de resíduos plásticos é discutida como um procedimento comparado à incineração conforme Kaminsky, Leidner, Albright *et al.*, Ferrero *et al.*, Thomé-Kozmiensky, Sinn *et al.*, Matsumoto *et al.*, Kobe Steel, Piskorz *et al.*, Jones e Radding, todos citados por BOCKHORN *et al.*(1999b).

A pirólise produz gases, óleos e *char* (resíduo sólido). Entretanto, para encontrar um mercado para tais produtos, um alto nível de qualidade é necessário para que eles possam ser efetivamente utilizados nos sistemas atuais de combustão. CAPUTO e PELAGAGGE (2002)

mostraram que somente plantas com utilização direta dos combustíveis gerados são economicamente viáveis.

3.5.1 Viabilidade Econômica

A viabilidade econômica de uma planta industrial de pirólise é função de fatores como:

- a) o tipo de resíduo industrial;
- b) o tipo de combustível produzido;
- c) os equipamentos que compõem uma planta de pirólise;
- d) e a análise de investimento.

3.5.1.1 O tipo de resíduo industrial

Os resíduos sólidos industriais são classificados segundo a norma NBR 10004 e estão descritos no item 3.4. da página 18.

3.5.1.2 O tipo de combustível produzido

Os óleos combustíveis industriais, de origem nacional ou estrangeira comercializados em todo o território nacional, são especificados pela AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP), através da Portaria N° 80 de 30 de abril de 1999. De acordo com o regulamento técnico anexo a esta portaria, os óleos são utilizados como combustível pela indústria, de modo geral em equipamentos destinados a geração de calor como fornos, caldeiras e secadores, ou indiretamente, em equipamentos destinados a produzir trabalho a partir de uma fonte térmica. Os óleos combustíveis são classificados como:

Tipo E – óleos combustíveis OC-1A, 2A, 1B e 2B (antigos BPF), eventualmente poderá requerer pré-aquecimento em regiões de clima muito frio;

Tipo W – Dispensa integralmente o pré-aquecimento. Também substitui os BPF e outros óleos combustíveis;

Tipo L – Bastante fluido, coloca-se como alternativa para misturas combustíveis que usam diesel ou querosene.

As características contempladas para a classificação dos óleos combustíveis são:

a) Ponto de fluidez - é a menor temperatura na qual o óleo flui quando sujeito a resfriamento sob condições determinadas de teste. Ele estabelece as condições de manuseio e estocagem do produto. Especificam-se limites variados para esta característica, dependendo das condições climáticas das regiões, de modo a facilitarem as condições de uso do produto;

b) Viscosidade – é a medida da sua resistência ao escoamento a uma determinada temperatura. É uma das características mais importantes do óleo combustível, que determina as condições de manuseio e utilização do produto;

c) Enxofre - o teor de enxofre de um óleo combustível depende da origem do petróleo e do processo através do qual foi produzido. É limitado por atuar em processos de corrosão e causar emissões poluentes;

d) Poder Calorífico Inferior- é o calor liberado pela queima (energia) por unidade de massa do combustível, à pressão constante de uma atmosfera, permanecendo a água no estado de vapor;

e) Ponto de Fulgor – é definido como a menor temperatura na qual o produto se vaporiza em quantidade suficiente para formar com o ar uma mistura capaz de inflamar-se momentaneamente quando se aplica centelha sobre a mesma. É um dado de segurança para o manuseio do produto e uma ferramenta utilizada para detectar a contaminação do óleo combustível por produtos mais leves;

f) Densidade Relativa a 20°C/ 4°C – é a relação entre a massa específica do produto a 20°C e a massa específica da água a 4°C. Como dado isolado tem pouco significado no que diz

respeito ao desempenho de queima do óleo combustível, no entanto, associado a outras propriedades pode-se determinar o poder calorífico superior e desta maneira permitir a determinação da eficiência dos equipamentos onde está sendo consumido.

3.5.1.3 Equipamentos que compõem uma planta de pirólise

O projeto de uma planta de pirólise de resíduos industriais, consiste em selecionar apropriadamente as unidades de processo, dimensionar os equipamentos envolvidos, definir as inter-conexões entre eles, identificar as tarefas e determinar o tempo de processamento em cada equipamento bem como a seqüência de produção.

BRANDRUP *et al.* (1996) revisaram as plantas de pirólise de plásticos e de outros resíduos poliméricos em funcionamento mostradas na Tabela 3.1.

Recentemente, no início de 2002, foi iniciada uma planta de pirólise para conversão de resíduos em energia no distrito de Friuli Venezia Giulia, na Itália com capacidade variando de 2300 a 2700 Kg/h para mistura de três tipos de resíduos: materiais de embalagens, resíduos de carpintaria e resíduos derivados de fábricas de vernizes (MENEGETTI *et al.*, 2002). BÉBAR *et al.* (2002) também estudaram um processo alternativo para a conversão de resíduos de alto poder calorífico em energia, introduzindo o processo de gaseificação no primeiro estágio de tratamento térmico de resíduos por incineração, obtendo uma redução no consumo de combustível auxiliar na câmara pós queimador bem como queda nas emissões de óxido de nitrogênio.

CAPUTO e PELAGAGGE (2002a,b) usaram um modelo computacional desenvolvido por Diaz em 1982, para comparar diversos arranjos de equipamentos constituintes de uma planta industrial de produção de combustível com poder calorífico superior acima de 4000Kcal/Kg, derivado de resíduo sólido municipal (RDF).

Tabela 3-1 Processos de pirólise de plásticos e outros resíduos poliméricos

| | Processos | Produtos | Estado de desenvolvimento |
|------------------|--|-----------------------|----------------------------------|
| DBA ¹ | Forno rotativo, indiretamente aquecido 450°- 500°C | Energia | 6 t/h Burgau/ Alemanha |
| Ebara | Dois leitos fluidizados, um oxidante | Energia | 4 t/h Yokohama/ Japão |
| Kobe Steel | Forno rotativo, indiretamente aquecido 500°- 700°C | Óleo, gás, energia | 1 t/h Kobe / Japão |
| VCC ² | Processo de Hidrogenação, indiretamente aquecido 500°- 550°C | Óleo, gás | 80000 t/ano Bottrop, Alemanha |
| KWU ³ | Forno rotativo, indiretamente aquecido 450°- 500°C | Energia | 3 t/h Ulm/ Alemanha |
| Noell | Forno rotativo, indiretamente aquecido 650°- 700°C | Óleo de pirólise, gás | 6 t/h Salzgitter/ Alemanha |
| BASF | Vaso de fusão indiretamente aquecido , 300-450°C | Óleo | 3 t/h Ludwigshafen/ Alemanha |
| VEBA Oel | Forno rotativo, indiretamente aquecido 600°- 850°C | Óleo, gás, energia | 500 Kg/h Gelsenkirchen/ Alemanha |
| Tsukishama Kikai | Dois leitos fluidizados | Energia | 3x6,25 t/h Funabashi/ Japão |
| Hamburgo | leito fluidizado, indiretamente aquecido 500°- 900°C | Óleo de pirólise, gás | 20 - 60 Kg/h Grangemonth, UK |

¹DBA Deutsche Babcock-Anlagen

²VCC Veba-Combi-Cracking

³KWU Kraftwerk Union Umwelttechnik

3.5.1.4 Análise de Investimento

Um resumo de custos de investimento e de operação são mostrados por DOUGLAS (1988). É prática comum no desenvolvimento do projeto de uma planta química, inicialmente calcular o tamanho dos equipamentos e estimar as quantidades de utilidades necessárias. Em

seguida são determinados os custos dos principais equipamentos e calculados os custos das utilidades. Finalmente uma análise de rentabilidade é realizada. Modelos simplificados para o investimento total do capital, custos de operação e medidas de rentabilidade são normalmente utilizados, conforme mostrado nos itens a seguir.

a) Investimento Total do Capital

É a soma do investimento do capital fixo, do capital de trabalho e do *start-up*, descritos abaixo conforme DOUGLAS (1988).

Os custos fixos consistem na soma dos custos diretos e indiretos, onde os diretos incluem os custos *on site* e *off site*. Custos *on site* correspondem àqueles com equipamentos instalados na área interna mostrada no fluxograma do processo e custos *off site* àqueles construídos em uma área geográfica diferente. Os custos indiretos são normalmente divididos em duas categorias: (1) honorários, os quais incluem despesas com engenharia, supervisão e construção; e (2) contingências.

O capital de trabalho representa os fundos necessários para operar a planta, isto é, para pagar matérias-primas, salários, etc. O capital de trabalho deve ser substituído a cada mês fora os rendimentos, assim deve-se ter verba disponível antes do início da operação da planta para preencher tanques e atingir o estoque inicial necessário. Por esta razão o capital de trabalho é considerado parte do investimento total.

Os custos *start-up* são fundos usados para dar partida na planta, pois nesta ocasião freqüentemente ocorrem gastos adicionais como perda de material, excesso de mão de obra, etc.

b) Custo Total de Produção

É a soma de custos de manufatura e despesas gerais ou SARE (Sales, Administration and Research).

Os custos de manufatura consistem da soma de custos diretos de produção e de cargas fixas. Os custos de produção direta incluem matérias-primas, utilidades, manutenção e reparos, suprimento, mão de obra operante, supervisão direta, etc. As cargas fixas são taxas locais, seguro, impostos, aluguel, etc.

c) Medidas de Rentabilidade

As duas mais comuns medidas de rentabilidade são: a taxa de retorno sobre o investimento (ROI) e o tempo de pagamento.

A taxa de retorno sobre o investimento é obtida dividindo o lucro do período pelo investimento total do capital e multiplicando por 100. O ROI é uma medida muito simples de rentabilidade, mas não considera a desvalorização do dinheiro com o tempo.

O tempo de pagamento é o tempo em anos necessário para recuperar os fundos que foram investidos. Os fundos adquiridos após o início da operação da planta consistem do lucro após os impostos somado à depreciação permitida, os quais são chamados de fluxo de caixa.

O lucro antes dos impostos é dado pelo rendimento subtraído do custo total de produção.

Para calcular o lucro após os impostos, deve-se considerar várias políticas de depreciação. A depreciação é considerada, pelo governo, uma despesa legítima da empresa, permitindo à mesma, deduzir uma fração do custo do equipamento. Para isso o governo especifica um tempo de vida médio para vários tipos de equipamentos de processo. Para petroquímica frequentemente assume-se 16 anos, enquanto para outras plantas químicas, 11 anos. Uma vez fixado o tempo de vida do processo, o governo ainda permite escolher entre métodos de cálculo de depreciação: linha reta ou sistema de recuperação de custo acelerado (ACRS) (DOUGLAS, 1988).

3.6 O Planejamento da Produção

Um sistema de planejamento da produção, segundo GELDERS e WASSENHOVE (1981), é composto por três níveis hierárquicos. No primeiro nível é determinado, com base nas decisões agregadas sobre produção e capacidade, o chamado programa mestre. Uma vez fixado o programa mestre, atinge-se o segundo nível da hierarquia, onde são determinadas as quantidades a serem produzidas (ou compradas) dos diferentes componentes. Definidas as quantidades bem como as datas de entrega dos diferentes componentes, alcança-se o terceiro e último nível, onde os programas de produção e as alocações dos recursos necessários são elaborados. Um planejamento de produção ruim pode conduzir facilmente à utilização não otimizada de recursos e materiais, atrasos nas datas de entrega, baixa qualidade de produtos, baixa lucratividade, etc.

Segundo MAZZUCO (1999), pelo menos três razões aparentes têm levado o problema do planejamento da produção à uma intensa e contínua exploração. A primeira é que o problema surge em diversas áreas. Embora tradicionalmente, os problemas do planejamento da produção fossem investigados, principalmente, em engenharia de produção e na área de pesquisa operacional, hoje o interesse por esse assunto, atinge diversas áreas, especialmente devido à crescente competitividade do mercado internacional de bens manufaturados. A segunda, por envolver um problema combinatorial de extrema dificuldade, tornando-se assim um desafio permanente aos pesquisadores. A terceira razão é porque as estratégias propostas para os problemas de planejamento são relativamente gerais e assim têm inspirado importantes métodos para a resolução de outros problemas combinatoriais.

3.6.1 Classificação do Problema de Planejamento da Produção

Da forma mais geral possível, isto é, englobando as principais características teóricas e práticas do problema de planejamento da produção, pode-se classificá-lo, segundo GRAVES (1981), pela:

- a) Geração de pedidos;
- b) Complexidade do processo produtivo;
- c) Critério de programação.

3.6.1.1 Geração de Pedidos

A geração de pedidos refere-se à origem dos pedidos que podem ser gerados diretamente pelas ordens de compra dos produtos pelos clientes (*open shop*), não mantendo nenhum estoque (produz diretamente para a venda) ou, indiretamente, por decisões de reposição de estoques (*closed shop*), onde todos os pedidos de compras são atendidos pelo estoque, e as tarefas de produção são geralmente conseqüências de decisões tomadas na reposição de estoques (produz para estoques e não diretamente para vendas). Um ambiente real de produção industrial, raramente, se caracteriza como puramente *open shop* ou *closed shop*.

3.6.1.2 Complexidade do processo produtivo

A complexidade do processamento está relacionada basicamente com o número de etapas de processamento associadas à produção de cada tarefa ou item. Uma subdivisão comum, segundo MAZZUCO (1999) é:

- a) um estágio, um processador;

- b) um estágio, processadores paralelos;
- c) múltiplos estágios, *flow shop*;
- d) múltiplos estágios, *job shop*.

Um estágio, um processador é a forma mais simples do problema. Todas as tarefas requerem um único passo no processamento, que deve ser executado em um único processador (máquina ou operário).

Um estágio, processadores paralelos, é similar ao problema anterior exceto que cada tarefa requer um único passo de processamento, que pode ser executado em qualquer um dos processadores paralelos existentes.

No caso de *múltiplos estágios*, cada tarefa requer processamento em um conjunto de processadores distintos, onde tipicamente existe uma severa ordem de precedência operacional a ser obedecida nas etapas de processamento de cada tarefa. As soluções viáveis são aquelas que satisfazem as relações de precedência.

3.6.1.3 Critério de Programação

A terceira e última dimensão, dentro da classificação adotada, critério de programação, trata com as medidas através das quais o planejamento da produção é avaliado. Duas classes abrangentes de critérios de avaliação são consideradas: a classe referente aos custos envolvidos no planejamento e a classe referente ao desempenho do planejamento. Os custos envolvidos compreendem os custos fixos associados com *setup*, estocagem de produtos e materiais, custos referentes a atrasos de entrega, etc. Já o desempenho pode ser avaliado de várias maneiras. Medidas comuns são os níveis de utilização dos recursos produtivos, percentagens de tarefas concluídas com atraso, tempo médio ou máximo de atraso, etc. Em grande parte dos ambientes de produção, a avaliação do planejamento da produção se faz através da combinação dessas

duas classes. Entretanto, a maioria das referências bibliográficas teóricas no assunto trata o problema com um único critério.

3.7 Scheduling de Processos em Batelada

Recentemente, tem havido uma tendência de construção de plantas flexíveis pequenas, que atendam as necessidades de mercado, renovando o interesse nos processos de produção em batelada.

Processos em batelada são usados na manufatura principalmente de alguns produtos químicos, farmacêuticos, alimentícios e certos tipos de polímeros. Desde que normalmente, os volumes de produção são pequenos, ou diversas substâncias utilizam o mesmo equipamento, as plantas de operação em batelada são freqüentemente plantas multiprodutos, o que requer uma produção seqüenciada. Especificamente, se tem que decidir a ordem na qual os produtos serão produzidos, em quais equipamentos produzir e o tempo de ciclo de cada batelada, o que acarreta um grande impacto econômico sobre o projeto.

O tempo de ciclo para processar um único produto representa o intervalo de tempo para a produção de uma batelada do produto e varia conforme o tipo de operação conduzida no processo em batelada, que pode ser:

- a) Não cruzada (*non overlapping*)
- b) Cruzada (*overlapping*)

O modo de operação não cruzada sem tempo morto é mostrado na Figura 3.1, onde cada batelada é iniciada somente quando a precedente for completada. Desta forma, nunca duas bateladas são manufaturadas simultaneamente. O termo *makespan* corresponde ao tempo total

necessário para produzir um determinado número de bateladas dentro de um horizonte de tempo pré-definido.

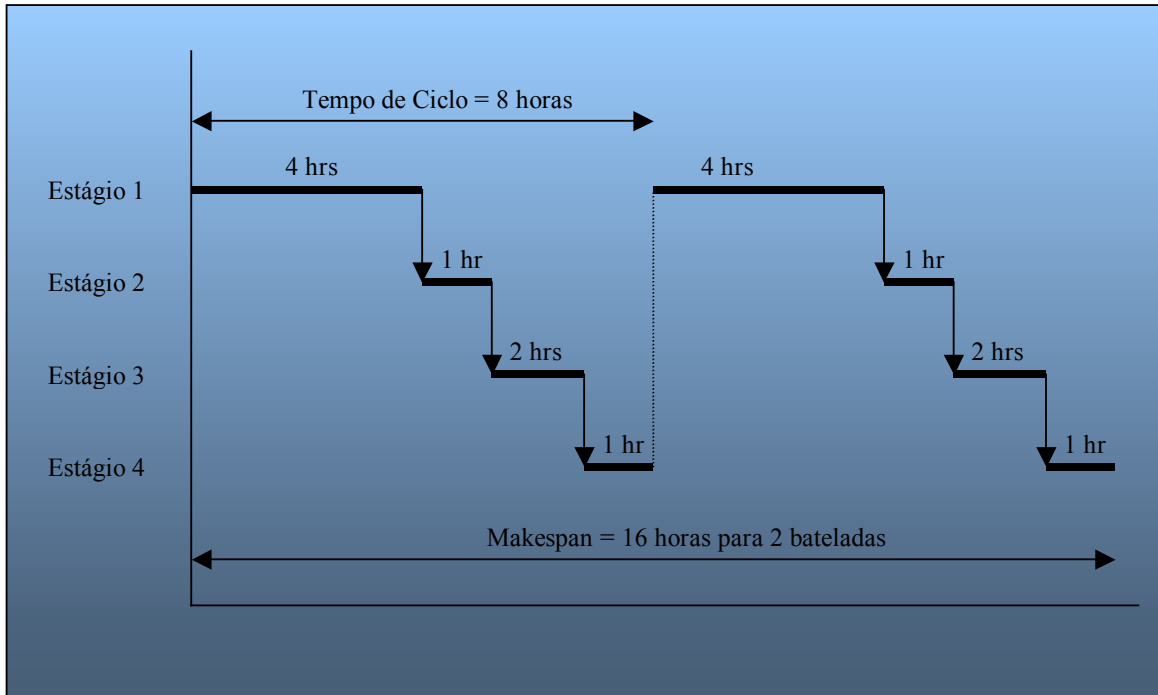


Figura 3-1 Operação não cruzada sem tempo morto.

Na operação cruzada sem tempo morto, mostrada na Figura 3.2, são eliminados os tempos ociosos tanto quanto possível, conduzindo então a bateladas de produção simultâneas

O tempo de ciclo para operação não cruzada é dado por:

$$T_c = \sum_{j=1}^M \tau_j$$

onde: τ_j é o tempo de processamento no estágio j .

M é o número máximo de estágios

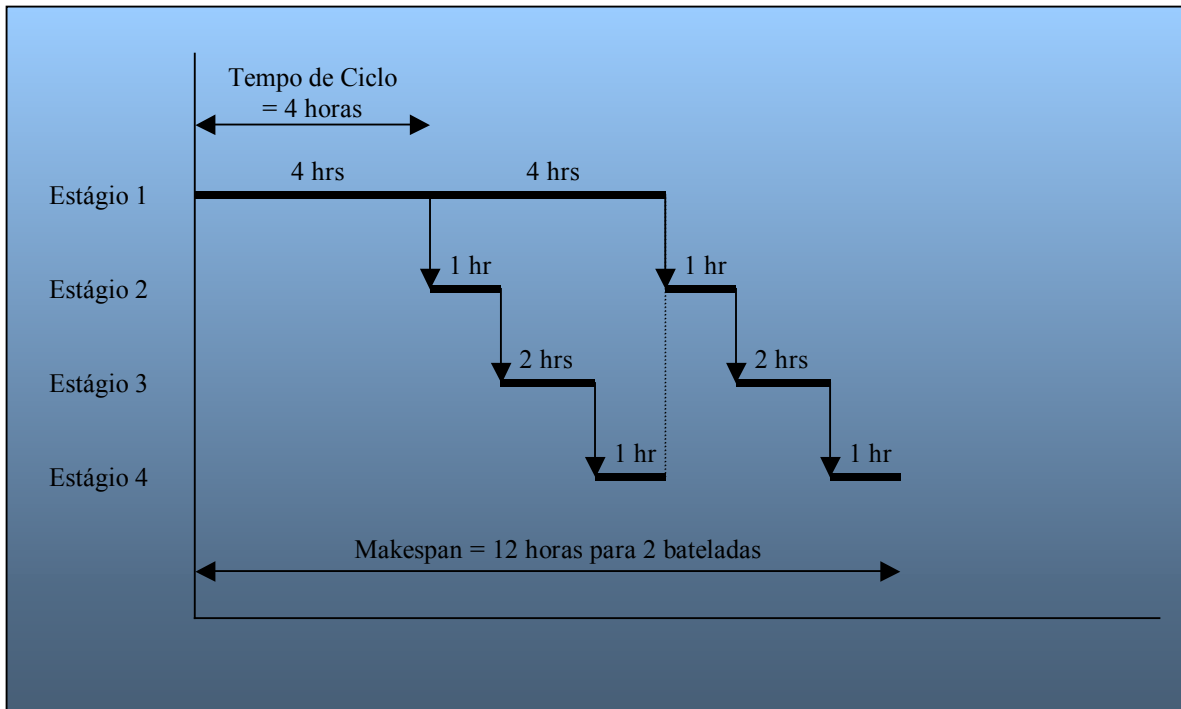


Figura 3-2 Operação cruzada sem tempo morto.

e o tempo de ciclo para operação cruzada é:

$$T_c = \max_{j=1, M} \{ \tau_j \}$$

Quando o processo batelada é usado para manufaturar dois ou mais produtos, não é possível obter uma expressão exata para o tempo de ciclo que vai depender do tipo de planta e da política de transferência do processo. Nesse caso, uma opção é trabalhar com campanhas. Uma campanha consiste de uma batelada ininterrupta de um determinado produto, sendo que campanhas de diferentes produtos podem ter diferentes períodos de duração.

Quanto ao tipo de planta, elas podem ser *flow shop* ou *job shop*, conforme mostrado nas Figuras 3.3 e 3.4 respectivamente. Em plantas *flow shop*, todos os produtos requerem todos os estágios seguindo a mesma seqüência de operações e nas plantas *job shop*, nem todos os

produtos requerem todos os estágios e/ou seguem a mesma seqüência. As plantas *flow shop* e *job shop* são também chamadas de plantas multiprodutos e multipropósitos, respectivamente.

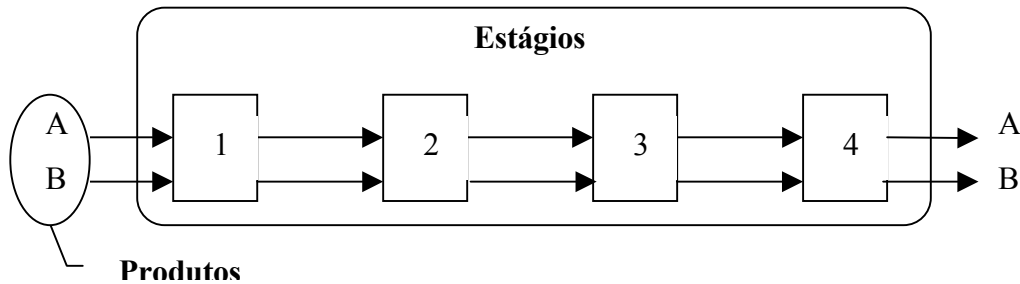


Figura 3-3 Planta flowshop

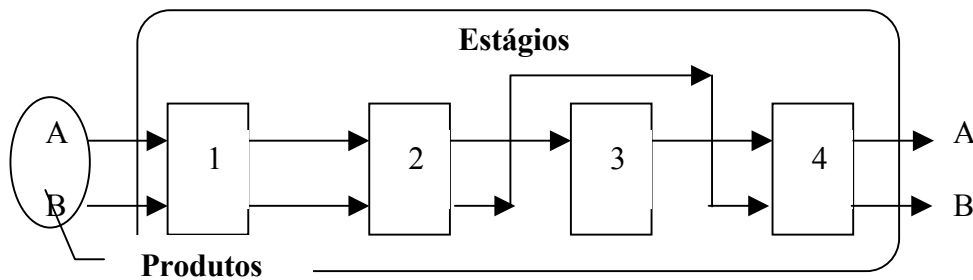


Figura 3-4 Planta jobshop

Com relação à política de transferência, segundo BIEGLER (1997), existem:

a) Transferência de espera zero – uma batelada, em qualquer estágio, deve ser transferida imediatamente para o próximo estágio. Comumente usada quando não existem vasos de armazenagem intermediários ou quando há restrições em manter o produto dentro do vaso em que se encontra por exemplo, devido a possibilidade de reações química.

b) Armazenagem intermediária ilimitada – é assumido que a batelada pode ser armazenada sem qualquer limite de capacidade do vaso de armazenagem.

c) Nenhuma armazenagem intermediária – permite a possibilidade de manter o material dentro do vaso de processamento.

3.8 Modelagem de Plantas Multiprodutos

O aumento da competição entre as indústrias químicas tem estimulado o surgimento de plantas multiprodutos, tornando a integração das várias operações de processo, tipicamente planejamento, *scheduling* e supervisão, cada vez mais complexas. A melhor forma de integração é atingida através de uma formulação e solução de modelos matemáticos apropriadamente estruturados.

3.8.1.1 Hierarquia das Operações de Processo

Os modelos de plantas multiprodutos, convencionalmente consideram as tarefas operacionais, vistas dentro de uma hierarquia como mostrado na Figura 3.5, pelas caixas em amarelo. A Figura 3.5 mostra que decisões estratégicas impõem objetivos e restrições sobre as decisões táticas que são implementadas e suportadas por várias funções de execução. A administração financeira e a gestão de contas fornecem os custos específicos, rendimentos, margens ou alvos financeiros que são usados dentro do processo de planejamento. As atualizações da produção são sincronizadas com as atualizações sobre a disponibilidade de material, demanda de clientes e disponibilidade de transportes. Os alvos para as taxas de produção e qualidade dos produtos passam do sistema de *scheduling* para o sistema de controle supervisorio, que determina as condições operacionais possíveis, próximas das necessidades de *scheduling*. A aquisição e análise de dados, análise e funções da gestão de contas fornecem o *feedback* sobre a operação atual da planta. A seguir serão brevemente descritos os elementos que constituem as funções chave de tomada de decisão dentro de uma indústria de processos

multiprodutos típica. DONALD E DOUGLAS (2000) definem essas funções da seguinte maneira:

1. *Forecasting*: Projetam as necessidades futuras do mercado ou de clientes específicos. É realizado pelo departamento de *marketing*. Muitas companhias geram *forecasts* para os próximos 12 a 18 meses, com foco primário sobre os próximos 2 a 3 meses.

2. Planejamento Estratégico: Pode ser considerado a cabeça do processo que define as variações desejadas dentro do mercado corrente, a longo prazo. Eles podem atuar no acesso a matérias primas, mercados geográficos, produção ou distribuição da capacidade. Os veículos para as mudanças incluem expedições de capital, contratos a longo prazo, aquisições, convênios ou até agregação com outras empresas. A definição de longo prazo, varia dependendo da indústria. Pode ser desde 5 a 10 anos para companhias produtoras em larga escala, como as refinarias, até de 1 a 3 anos para produtores em pequena escala. O tempo de resposta associado com as decisões também varia. Pode ser de 5 anos para construir uma nova planta de processamento ou 6 meses para completar uma aquisição.

3. Planejamento Tático: É a função que ajusta os alvos para performance de operação e coordena atividades através de vendas, gerenciamento de materiais, manufatura e distribuição. Esse processo de planejamento tipicamente considera horizontes de tempo de 2 a 6 meses, planejados mensalmente.

4. *Scheduling*: Define o sequenciamento, tempo e volume de atividades específicas necessárias para atingir os objetivos da companhia. As principais variáveis de decisão são o tempo de início de uma operação, os equipamentos que serão utilizados, o tempo de processamento e o volume processado. O elemento diretor é a demanda do produto. O horizonte de tempo considerado pelas funções de *scheduling* tipicamente variam de 2 a 3 dias até 2 a 3 meses e está relacionado com o tempo para completar um ciclo do produto.

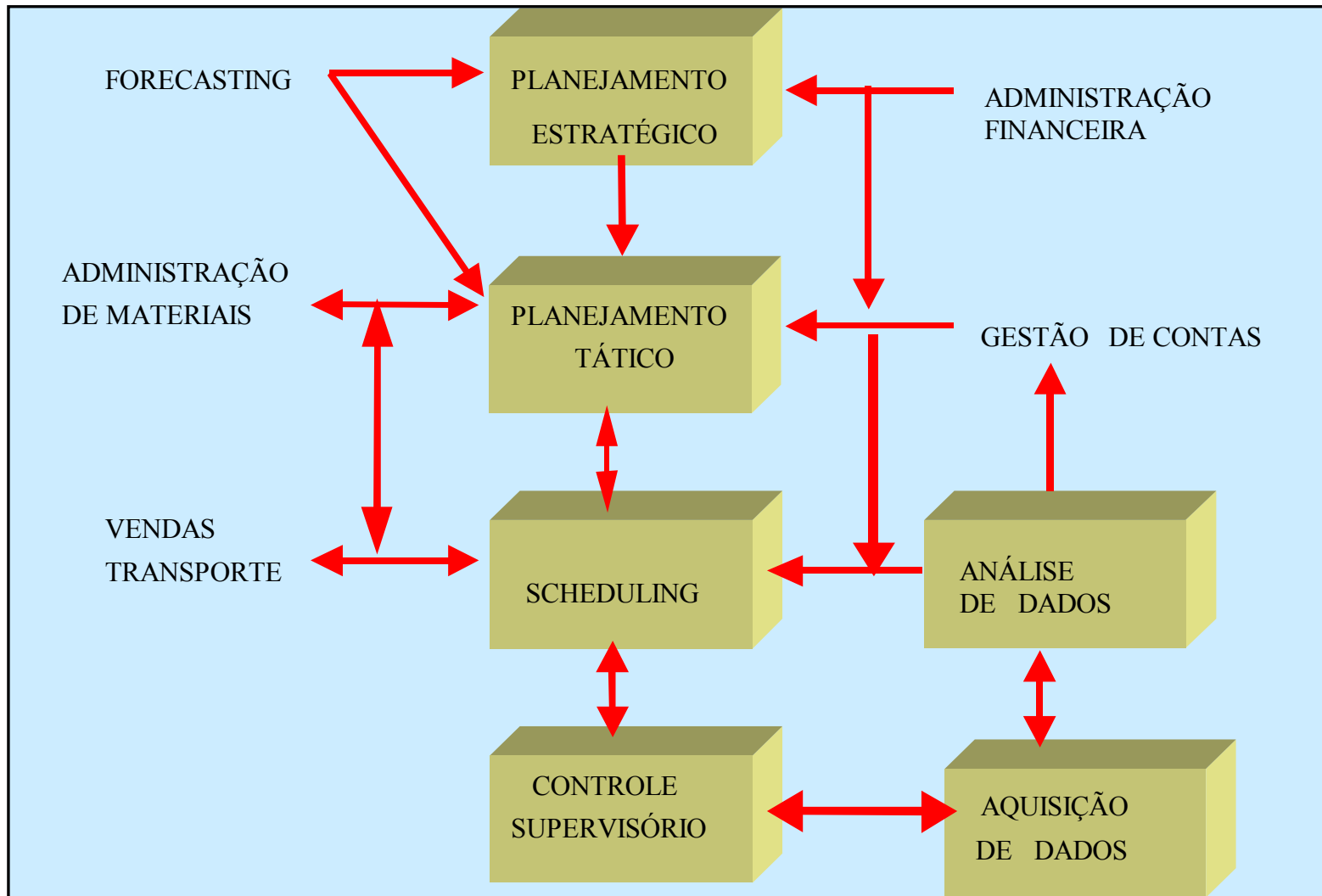


Figura 3-5 Hierarquia das operações de processo

5. Controle Supervisório: Consiste na atualização *on line* de *set points*, o que significa dizer que envolve a manipulação em tempo real das variáveis de processo selecionadas de maneira a manter a qualidade dos produtos e as taxas de produção próximas do alvo desejado, enquanto garantem que os limites do equipamento não foram violados.

6. Aquisição e Análise de Dados: Proporciona o *feedback* sobre a performance atual da planta. Como a modelagem tem papel central dentro das técnicas de solução atuais, o *feedback* sobre a validação do modelo é importante em sistemas *on line*.

7. Gestão de Contas: É a geração dos índices de performance para a produção da planta e o armazenamento de dados para recálculo e controle gerencial.

8. Administração Financeira: Inclui o controle do fluxo de dinheiro gerado pela planta, com significantes implicações financeiras.

9. Administração de Material, Vendas e Transporte: Esses elementos só foram colocados para lembrar que o planejamento, *scheduling* e controle de processo envolvem essas funções também, isto é, a execução dentro dessas áreas, envolve sistemas baseados em transações como aprovação de crédito, ordens de compra, faturas, etc.

3.8.1.2 Modelos de Integração das Operações de Processo

As tarefas típicas das operações de processo incluem planejamento, *scheduling*, controle supervisório e aquisição de dados. A melhor forma de integração dos níveis hierárquicos mostrados na Figura 3.5 é através de modelos matemáticos. É evidente que o planejamento da produção e *scheduling*, idealmente, devem ser analisados e otimizados juntos, pois, os objetivos da produção, ajustados no nível de planejamento dependem não só das considerações de marketing, mas também devem considerar a viabilidade de implementá-las em nível de *scheduling*. O planejamento é um problema em nível *macro*, cujo principal objetivo é determinar os alvos da produção sobre um horizonte de tempo específico, dados *forecasting* de

marketing para preços, demandas de produtos e considerações de disponibilidade de equipamentos e inventários. O *scheduling*, por outro lado, é um problema em nível *micro*, que está dentro do problema de planejamento de produção e que é comumente considerado dentro de um curto horizonte de tempo. *Scheduling* envolve decidir a seqüência na qual vários produtos devem ser processados em cada equipamento tal que atinjam os alvos que foram ajustados pelo problema de planejamento. Portanto, as decisões tomadas no nível de planejamento de produção têm um grande impacto no nível de *scheduling*, já que é no nível de *scheduling* que é determinada a viabilidade de conduzir os objetivos da produção. Entretanto, integrar planejamento e *scheduling* não é uma tarefa fácil, visto que o problema de *scheduling*, isolado, com demanda fixa, já não é um problema trivial, devido a sua natureza altamente combinatorial.

Muitos problemas de *scheduling* necessitam de um grande esforço computacional para resolvê-los, este aumentando exponencialmente com o tamanho do problema (GAREY *et al.*(1976)), além da dificuldade em checar a viabilidade do *scheduling* resultante, definida pelas seguintes restrições: (a) no mínimo um item é produzido no processador por vez; (b) o tempo total para realizar todas as campanhas não deve exceder a capacidade de tempo disponível; e (c) a demanda é satisfeita sem falta de matérias primas.

O modelo de planejamento de produção e *scheduling* para uma planta multiprodutos com um estágio e um processador com capacidade limitada é comumente denominado de problema de *scheduling* do lote econômico (ELSP), e é largamente usado em muitas indústrias de manufatura, especialmente quando a planta deve produzir produtos que diferem em suas características físicas, como a cor, a largura e a espessura. O ELSP envolve determinar o sequenciamento de produção de múltiplos produtos sobre um processador simples dada uma demanda constante, taxas de produção finitas e vários custos de inventários e de *setup*. O ELSP tem sido extensivamente estudado nos últimos trinta anos e numerosas aproximações existem

na literatura para resolver suas muitas variantes. Estas, citadas por OH e KARIMI (2001), incluem a programação dinâmica de Bomberger, a análise marginal de Fujita, o procedimento do período básico estendido melhorado de Haessler e a aproximação dos tamanhos de lotes variando no tempo de Dobson. Segundo os autores, a maioria desses métodos apresenta problemas que limitam sua aceitabilidade e aplicabilidade no ambiente industrial real, especialmente por tratarem o horizonte de planejamento como uma incógnita e os tempos e custos de *setup* independentes da seqüência de processamento.

Modelos de planejamento de produção e *scheduling* envolvendo múltiplos estágios e múltiplos processadores são conhecidos como modelos de plantas batelada *flow shop* ou *job shop*, conforme a seqüência de processamento. A maior parte desses modelos que são utilizados para tratamento simultâneo de planejamento de produção e *scheduling*, consideram um esquema de decomposição hierárquica onde o problema de planejamento global é decomposto em dois níveis. No nível superior, o problema de planejamento é representado como um modelo de programação linear (PL) que ajusta os objetivos da produção para maximizar o lucro. No nível inferior, o problema de *scheduling* é reduzido para uma seqüência de subproblemas que devem atingir os objetivos ajustados pelo problema do planejamento. A integração dos dois níveis é conduzida por um método heurístico. Várias aproximações têm sido propostas para integrar planejamento e *scheduling*, tanto tratando o problema através de um modelo monolítico, resolvendo-o para um horizonte de tempo comum, como melhorando a estratégia de decomposição, separando em um problema em nível de planejamento e outro em nível de *scheduling* (MAUDERLI e RIPPIN, 1979, LAZARO *et al.*, 1989, BIREWAR e GROSSMANN, 1990, ZENTNER *et al.*, 1994, PETKOV e MARNAS, 1997, KARIMI e MCDONALD, 1997, SHOBRYE e WHITE, 2000, DAS *et al.*, 2000, IP *et al.*, 2000, SUSARA e GROSSMANN, 2003 e KIM *et al.*, 2003). Um modelo monolítico é ideal, desde que englobe os principais elementos associados à produção e ao *scheduling* mas deve ser aplicado para

problemas de *scheduling* não muito grandes, devido a exigência de um extensivo esforço computacional. BOSE e PEKONY (2000) propuseram um modelo preditivo incorporando incertezas, onde um modelo de *forecasting* calcula os inventários alvos (variável controlada), nos períodos futuros e um modelo de *scheduling* tenta atingir esses alvos através de tarefas de *scheduling* (variáveis manipuladas).

Nesse estudo, é desenvolvido um modelo em nível de planejamento, e a integração é determinada através de uma estratégia de solução que usa Algoritmos Genéticos, que resolve simultaneamente os problema de planejamento, *scheduling* e supervisão.

3.9 Algoritmos Genéticos Aplicados a Problemas de Larga Escala

A solução de problemas de elevado nível de complexidade computacional tem sido um desafio constante para os pesquisadores de diversas áreas.

Particularmente em Otimização, Pesquisa Operacional, Ciências da Computação, Matemática e Engenharias, nos defrontamos freqüentemente com problemas altamente combinatórios considerados problemas de larga escala, cuja solução ótima é limitada a alguns casos específicos.

Os métodos convencionais de otimização exata se caracterizam pela rigidez de seus modelos matemáticos representados através de teoremas, dificultando a solução de situações reais cada vez mais complexas e dinâmicas. O problema desta falta de flexibilidade foi um pouco reduzido a partir do momento em que se passou a associar técnicas de otimização com ferramentas de Inteligência Artificial, mais especificamente, com as ferramentas de busca heurística. De fato, os algoritmos heurísticos, ou simplesmente, heurísticas, caracterizam-se pela sua flexibilidade e têm como objetivo encontrar soluções de boa qualidade num tempo computacional suportável. Contudo, as heurísticas isoladamente também possuem suas limitações, e a principal delas é a deficiência histórica de, em muitos casos, não conseguirem

superar as armadilhas dos ótimos locais em problemas de otimização. Nos anos 80 surgiram diversos artigos sobre novos métodos heurísticos com ferramentas adicionais para tentar superar as limitações das heurísticas convencionais. Dentre as várias técnicas produzidas para tentar reduzir o risco de paradas prematuras, destacamos: as Redes Neuroniais Artificiais (*RNs*), *Simulated Annealing* (SA), *Tabu Search* (TS), todas citadas por OCHI (2002), além do recente método de otimização de colônia de formigas (AFM), descrito por WANG e ZHAO (2002) e comparado com os citados por Ochi.

Embora com filosofias distintas, estas metaheurísticas possuem em comum características que as distinguem das heurísticas convencionais, como por exemplo, incluir ferramentas para tentar escapar das armadilhas dos ótimos locais e a facilidade para trabalhar em ambientes diferentes. Dentre estas técnicas, os Algoritmos Genéticos têm se destacado na solução de uma gama de problemas, inclusive de grande escala, devido a sua simplicidade de solução, fácil interface e flexibilidade. Assim, Algoritmos Genéticos tem encontrado aplicações nas áreas de engenharia, *business* e manufatura, como exemplo, GOLDBERG (1989) descreve o uso de Algoritmos Genéticos para desenvolver um sistema para controle de uma tubulação de gás, consistindo de um grande número de ramificações e válvulas para regular o fluxo de gás. Ele também tem descrito seu uso em aplicações tais como processamento de imagens, pesquisa operacional e aprendizagem de máquina. DASGUPTA e MICHALEWICZ (1997) relataram aplicações de Algoritmos Genéticos em projetos arquitetônicos, *scheduling*, projeto de circuito eletrônico, processamento de sinais, configuração de redes e controle robótico, e WILLIAN e PING (2003) aplicaram *AG* para *scheduling* de componentes de máquinas de montagem de *chip*.

Neste trabalho propõe-se o desenvolvimento de uma metodologia de otimização para solução simultânea do problema do planejamento de produção, *scheduling* e supervisão de um reator de pirólise batelada multiprodutos. Esse é um problema de larga escala e de difícil

solução tanto pela complexidade das reações químicas quanto pelas restrições de demanda e de horizonte de tempo envolvidos durante a busca pelo ótimo, tornando inadequado o uso de métodos de otimização convencionais. Algoritmos Genéticos em codificação real é proposto como método de solução, tendo obtido sucesso na solução de problemas de otimização envolvendo planejamento de produção e *scheduling*. Entretanto, as várias pesquisas que vêm sendo desenvolvidas nessa área, são limitadas ao estudo do *scheduling* de máquinas *flow shop* e *job shop*, onde Algoritmos Genéticos tem mostrado grande potencialidade de solução de maneira efetiva e eficiente (SRIKANTH e BARKHA, 2004, JENSEN *et al.*, 2003, WANG *et al.*, 2000, LEE *et al.*, 1997a,b, SIKORA, 1996, REEVES, 1995, CHEN *et al.*, 1995, HAMADA *et al.*, 1995, WANG e FANG, 1997, BIEGEL e DAVERN, 1990, ZHANG *et al.*, 1997 e GUPTA *et al.*, 1993).

O capítulo seguinte discute os fundamentos teóricos da otimização e do método de Algoritmos Genéticos, incluindo os parâmetros, operadores genéticos e estratégias para melhoria da performance do método, com ênfase na codificação real.

Capítulo 4

Fundamentos Teóricos

Este capítulo aborda as duas principais fases da pesquisa operacional que são a formulação do problema e os métodos para sua solução. O método em estudo é o de Algoritmos Genéticos, em codificação real usando além de seus operadores convencionais, outros como elitismo e escalonamento.

4.1 Formulação do Problema

A formulação do problema é a principal etapa na solução de problemas envolvendo otimização. Ela consiste em identificar os principais elementos de uma dada aplicação e organizá-los dentro de uma forma matemática pré estabelecida, como mostrado a seguir, segundo CASTRO (2001):

$$\text{Max. ou Min. } f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (\text{função objetiva})$$

sujeito a:

$$g_j(\mathbf{x}) \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (\text{restrições de comportamento})$$

$$h_k(\mathbf{x}) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, K$$

$$x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (\text{restrições laterais nas variáveis de projeto } x_i)$$

A seguir, serão definidos alguns conceitos empregados em otimização e de conhecimento imprescindível para a compreensão deste trabalho, baseado em CASTRO (2001).

4.1.1 Variável de projeto

As variáveis de projeto são aquelas que se alteram durante o processo de otimização. Elas podem ser contínuas (reais), inteiras ou discretas (valores compreendidos dentro de um certo conjunto fixo).

4.1.2 Restrições

As restrições são funções de igualdade ou desigualdade que descrevem situações indesejáveis de projeto. Dividem-se em dois grupos:

- a) Restrições Laterais: são efetuadas diretamente sobre as variáveis de projeto, limitando seus valores;
- b) Restrições de Comportamento: são condições desejáveis de limites de tensões, deslocamentos, frequências naturais de vibração, etc.

4.1.3 Espaço de Busca ou Região Viável

É o conjunto, espaço ou região que compreende as soluções possíveis ou viáveis do problema a ser otimizado. Deve ser caracterizado pelas funções de restrição, que definem as soluções viáveis do problema a ser resolvido.

4.1.4 Função Objetiva ou de Avaliação

É a função que se quer otimizar. Ela pode ser de uma ou mais variáveis, sendo estas duas opções classificadas como otimização *unidimensional* e *multidimensional* respectivamente.

4.1.5 Ponto Ótimo

É o ponto, caracterizado pelo vetor $x^* = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, formado pelas variáveis de projeto que extremizam a função objetivo e satisfazem as restrições.

4.1.6 Valor Ótimo

É o valor da função objetivo $f(x^*)$ no ponto ótimo.

4.1.7 Solução Ótima

É o par formado pelo ponto ótimo e o valor ótimo $[x^*, f(x^*)]$. A solução ótima pode ser:

- a. Local; quando o valor ótimo é localizado;
- b. Global; quando o valor ótimo é global na região viável;
- c. Restringida; quando há restrições satisfeitas como igualdade (ativas) no ponto ótimo;
- d. Não-restringida; quando não há restrições ativas no ponto ótimo.

4.2 Introdução ao Método de Algoritmos Genéticos

Muitos problemas podem ser resolvidos de uma forma computacional determinística; contudo, outros problemas não têm um método de resolução exato, ou os métodos para a obtenção de tal solução são complexos em demasia em sua implementação e utilização. Para a

resolução destes problemas, utilizam-se métodos heurísticos e metaheurísticos, como os Algoritmos Genéticos, desta seção em diante denominado *AGs*.

Os *AGs* fazem parte da área da Inteligência artificial e são métodos generalizados de busca e otimização que simulam os processos naturais da evolução, aplicando a idéia *darwiniana* de seleção natural das espécies.

Segundo o *site* www.din.uem.br/ia/geneticos (2004), estes algoritmos estão baseados nos processos genéticos dos organismos biológicos, codificando uma possível solução a um problema de “cromossomo” composto por cadeia de bits e caracteres. Estes cromossomos representam indivíduos que são levados ao longo de várias gerações, na forma similar aos problemas naturais, evoluindo de acordo com os princípios de seleção natural e sobrevivência dos mais aptos, descritos pela primeira vez por Charles Darwin em seu livro “A Origem das Espécies”. Simulando estes processos, os Algoritmos Genéticos são capazes de “evoluir” soluções de problemas do mundo real.

Na natureza os indivíduos competem entre si por recursos como comida, água e refúgio. Adicionalmente, entre os animais de uma mesma espécie, aqueles que não obtêm êxito tendem a ter um número reduzido de descendentes, com menor probabilidade de seus genes serem propagados ao longo de sucessivas gerações. A combinação entre os genes dos indivíduos que perduram na espécie pode produzir um novo indivíduo muito melhor adaptado às características de seu meio ambiente.

Os *AGs* utilizam uma analogia direta deste fenômeno de evolução na natureza, onde cada indivíduo representa uma possível solução para um problema dado. A cada indivíduo se atribui uma pontuação de adaptação, dependendo da resposta dada ao problema por este indivíduo. Aos mais adaptados é dada a oportunidade de reproduzir-se mediante cruzamento com outros indivíduos da população, produzindo descendentes com características de ambas as partes. Se um Algoritmo Genético for desenvolvido corretamente, a população (conjunto de

possíveis respostas) convergirá a uma solução boa para o problema proposto e talvez até ótima (RIBEIRO *et al.*, 2003).

AGs foram inventados por John Holland em 1960 e desenvolvidos na Universidade de Michigan entre 1960 e 1970. Em contraste com as estratégias de evolução e programação evolucionária, o objetivo original de Holland não era desenvolver algoritmos para resolver problemas específicos, mas sim, formalmente estudar como o fenômeno da adaptação ocorre na natureza e desenvolver as formas pelas quais os mecanismos de adaptação natural poderiam ser importados para sistemas de computadores. Entretanto, após ser introduzido por Holland em seu livro *Adaptation in Natural and Artificial Systems* em 1975, *AGs* vêm sendo aplicados para uma larga variedade de problemas (MELANIE, 1998). Algumas áreas de aplicação típicas são: o problema do caixeiro viajante, o problema de *scheduling*, o problema de projetar *layout* de circuitos, problema de controle de rede de comunicação e o problema de controle em tempo real em sistemas de manufatura (MIRANDA, 2004).

4.3 Definição e Funcionamento do Método

Algoritmos Genéticos é uma técnica de pesquisa probabilística baseada na evolução natural, onde os princípios fundamentais da genética conduziram ao desenvolvimento do método, isto é, os indivíduos mais aptos de uma determinada população são os que sobrevivem, pois se adaptam mais facilmente às mudanças ocorridas em seu meio. Sabe-se que essas mudanças se efetuam nos genes de um indivíduo e que suas características mais adaptadas são transmitidas para seus descendentes quando esses indivíduos se reproduzem.

A aplicação de *AGs* consiste em obter um espaço de solução do problema que é representado por uma população de estruturas onde cada estrutura é uma possível solução. Portanto, um determinado número de estruturas é escolhido para formar a geração inicial. As estruturas da próxima geração são geradas aplicando operadores genéticos, basicamente

seleção, reprodução e mutação, às estruturas dos pais selecionados na geração atual. De acordo com a idéia de que “bons pais produzem bons filhos”, uma estrutura melhor adaptada, isto é, com maior valor de *fitness* na geração atual, terá maior probabilidade de ser selecionada como pai (similar ao conceito de sobrevivência). Quando este processo é repetido, observa-se um contínuo melhoramento nas performances das estruturas através das gerações.

4.4 Diferenças entre os Algoritmos Genéticos e os Métodos Tradicionais de Otimização

Os Algoritmos Genéticos, segundo CLAUMANN (1999), diferem dos métodos de otimização convencionais, principalmente, nos seguintes aspectos:

a) As variáveis de um problema a ser otimizado podem ser codificadas em algum alfabeto, tal como o binário. Neste caso, as operações efetuadas resumem-se a cópias e trocas de *bits*;

b) Algoritmos Genéticos operam com uma população de possíveis soluções da otimização (indivíduos ou elementos) não com apenas uma solução. A robustez dos AGs à estagnação em mínimos locais deve-se à utilização de uma população cujos indivíduos são espalhados inicialmente por todo o espaço de pesquisa. Eventualmente alguns indivíduos da população podem convergir para ótimos locais, porém, isso dificilmente acontecerá com todos ao mesmo tempo;

c) A geração de novos indivíduos nos Algoritmos Genéticos não é realizada de forma determinística, mas, através de modificações aleatórias nos indivíduos da população atual.

Além disso, os AGs simplificam a solução, porque não há necessidade de se trabalhar sobre todos os dados do problema, basta que se conheça o que deve ser maximizado e quais são as variáveis que devem ser julgadas.

4.5 Terminologia empregada em Algoritmos Genéticos

A comparação entre os principais termos usados em sistemas naturais e aqueles aplicados em Algoritmos Genéticos é mostrada na Tabela 4.1.

Tabela 4-1 Comparação entre terminologia natural e AGs

| NATURAL | ALGORITMO GENÉTICO |
|------------|---|
| cromossomo | String |
| Gene | Característica ou detector |
| Alelo | Valor da característica |
| Lócus | Posição na string |
| Genótipo | Estrutura |
| Fenótipo | Conjunto de parâmetros, solução alternativa ou ponto. |

Todo organismo vivo é composto de células e cada célula contém um conjunto de um ou mais cromossomos, no sistema artificial, chamados de *strings*. Um cromossomo pode ser conceitualmente dividido em genes – blocos de DNA. Muito superficialmente, pode-se pensar em um gene como responsável por uma característica, como por exemplo a cor dos olhos. Por isso, o gene é traduzido como característica ou detector em *AGs*. As diferentes possibilidades para um gene (por exemplo azul, verde ou marron para a cor dos olhos), são chamados nos sistemas naturais de alelos. Cada gene está localizado em uma posição particular no cromossomo, chamado *lócus*.

Muitos organismos têm múltiplos cromossomos em cada célula. A coleção completa do material genético (todos os cromossomos juntos) é chamada de genótipo do organismo. Em sistemas genéticos artificiais são denominados de estruturas.

Em sistemas naturais a interação entre um organismo e seu ambiente é conhecido como fenótipo. O equivalente ao fenótipo, nos Algoritmos Genéticos, são as variáveis decodificadas, também chamadas de conjunto de parâmetros, solução alternativa ou ponto no espaço de solução.

4.6 O “Algoritmo Genético Genérico” (AGG)

Os pesquisadores referem-se a “Algoritmos Genéticos” ou então a “um Algoritmo Genético” e não “ao Algoritmo Genético”, pois AGs são uma classe de procedimentos com muitos passos separados, e cada um destes passos possui muitas variações possíveis, como por exemplo os algoritmos genéticos genérico, genitor, geracional, híbridos, etc (MIRANDA, 2004). Entretanto, os AGs contêm, no mínimo, os seguintes elementos comuns: população de cromossomos, seleção de pais de acordo com um valor de aptidão (*fitness*), reprodução (*crossover*) para gerar novos indivíduos e mutação randômica desses indivíduos. Esses elementos compõem o chamado algoritmo genético genérico, que é a forma mais simples de Algoritmos Genéticos.

Dado um problema e uma representação de *string* por *bits* para as soluções candidatas, um AGG opera de acordo com a estrutura algorítmica apresentada na Figura 4.1.

Cada interação deste processo é chamada de geração, e o término do algoritmo ocorre quando a população deixar de produzir descendência notoriamente diferente da que a originou, ou quando o número de gerações, se anteriormente definido, for superado.

1. Iniciar com uma população randomicamente gerada de n cromossomos, representados por *strings* binárias (0 ou 1), que são soluções candidatas para o problema.
2. Decodificar as *strings*, calcular o valor da função objetivo para cada uma delas e associar esses valores com o *fitness* $f(x)$ de cada x da população.
3. Repetir os itens a seguir, até n filhos terem sido criados, pois o *AGG* trabalha com tamanho de população fixa.
4. Selecionar um par de *strings* para serem os pais, a partir da população atual, sendo que a probabilidade de seleção é função do valor da aptidão ou *fitness*, que está relacionado ao valor da função objetiva. A seleção é feita de forma que uma mesma *string* possa ser selecionada mais de uma vez para tornar-se um pai.
5. Com a probabilidade p_c (probabilidade ou taxa de *crossover*), deve-se copiar os pais selecionados e trocar todos os *bits* a partir de uma posição aleatoriamente escolhida na cadeia das *strings*. As *strings* selecionadas são chamadas de pais e as geradas a partir desta troca de filhas. Se nenhum *crossover* ocorrer, forme dois filhos que sejam cópias exatas de seus respectivos pais.
6. Realizar a mutação (troca de *bits*) de dois filhos em cada *locus* com probabilidade p_m (probabilidade ou taxa de mutação), e insira os cromossomos resultantes dentro da nova população.
7. Substituir a população atual pela nova população gerada.
8. Ir para a etapa 2.

Figura 4-1 Representação algorítmica de operação de um *AGG*

4.7 Parâmetros Genéticos

É importante também analisar de que maneira alguns parâmetros influenciam no comportamento dos Algoritmos Genéticos. A escolha dos operadores, juntamente com a determinação da função objetiva e da apropriada representação dos cromossomos são determinantes para o sucesso de um *AG*. Eles são usados para criar novas soluções baseadas nas soluções existentes na população.

4.7.1 Tamanho da População

O tamanho da população indica o número de cromossomos em cada população, normalmente constante durante a evolução, afetando o desempenho global e a eficiência dos *AGs*.

Uma população pequena oferece uma pequena cobertura do espaço de busca, causando uma queda no desempenho. Uma grande população fornece uma melhor cobertura do domínio do problema e previne a convergência prematura para soluções locais. Entretanto, com uma grande população tornam-se necessários recursos computacionais maiores, ou um tempo maior de processamento do problema. Logo, deve-se buscar um ponto de equilíbrio no que diz respeito ao tamanho escolhido para a população (UEM, 2004).

4.7.2 Taxa de *Crossover*

Quanto maior for esta taxa, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população. Entretanto, isto pode gerar um efeito indesejado, pois a maior parte da população será substituída podendo ocorrer perda de estruturas de alta aptidão. Com um valor baixo, o algoritmo pode tornar-se muito lento (UEM, 2004). Geralmente a taxa de *crossover* varia em torno de 0.95 (CLAUMANN, 1999).

4.7.3 Taxa de Mutação

A taxa de mutação indica a probabilidade ou taxa em que haverá a mutação de cromossomos nas populações ao longo da evolução.

A mutação é empregada para fornecer novas informações dentro das populações, prevenindo que as mesmas se tornem saturadas com cromossomos similares à medida que visa aumentar a diversidade populacional e possibilita ainda uma maior varredura do espaço de busca.

Há de se tomar cuidado, pois com uma taxa muito alta a busca pode se tornar essencialmente aleatória (UEM, 2004).

Alguns pesquisadores recomendam a escolha da taxa de mutação com base no tamanho dos cromossomos e das populações.

DE JONG (1975) sugere que a taxa de mutação deva ser inversamente proporcional ao tamanho da população.

Hesser e Manner, citados por CASTRO (2001) sugerem que uma taxa ótima de mutação pode ser achada pela expressão:

$$P_m = (NL^{1/2})^{-1}$$

sendo N o tamanho da população e L o comprimento dos cromossomos

Como os demais parâmetros, a taxa de mutação ideal dependerá da aplicação a ser resolvida, todavia, a maioria das taxas utilizadas varia entre 0,001 e 0,05 (MIRANDA, 2004).

4.8 Operadores Genéticos

Os mecanismos do *AGG* são surpreendentemente simples, envolvendo nada mais complexo do que cálculo de números aleatórios, cópias de *strings* e alguma troca parcial de bits.

Os operadores de seleção, *crossover* e mutação, citados no *AGG* são considerados operadores fundamentais, pois estão presentes em qualquer Algoritmo Genético. Além destes, são descritos também os operadores escalonamento e elitismo que, segundo a literatura, têm mostrado melhora significativa quanto a performance dos Algoritmos Genéticos e são utilizados neste trabalho (CLAUMANN,1999).

4.8.1 Seleção

A seleção é o operador que determina quais indivíduos são mais aptos para gerar uma nova população por cruzamento. Cada indivíduo tem uma probabilidade de ser selecionado proporcional a sua aptidão ou *fitness*. O *fitness*, no mais simples dos casos, é igualado à função objetivo.

4.8.1.1 Amostragem Universal Estocástica (Roleta)

Para visualizar este método considere um círculo dividido em n regiões (tamanho da população), onde a área de cada região é proporcional ao *fitness* do indivíduo, como mostrado na Figura 4.2. Coloca-se sobre este círculo uma “roleta” com n cursores, igualmente espaçados. Após um giro da roleta a posição dos cursores indica os indivíduos selecionados. Evidentemente, os indivíduos cujas regiões possuem maior área terão maior probabilidade de serem selecionados várias vezes. Como consequência, a seleção de indivíduos pode conter várias cópias de um mesmo indivíduo enquanto outros podem desaparecer (UEM, 2004).

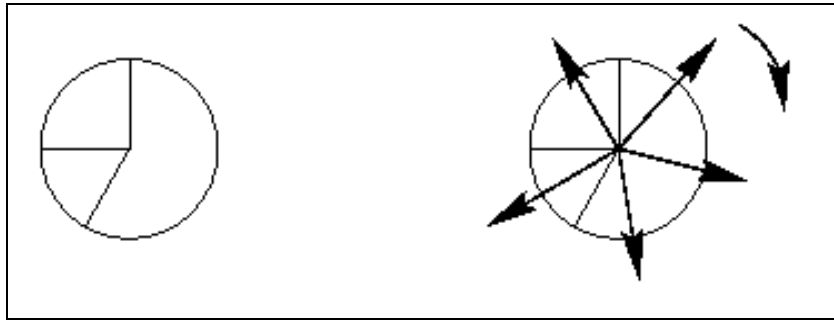


Figura 4-2 Amostragem universal estocástica

4.8.1.2 Seleção “Tournament”

Este escolhe um grupo de N indivíduos aleatoriamente sendo que cada indivíduo da população possui igual probabilidade de ser sorteado. No entanto, é selecionado o indivíduo de *fitness* mais alto entre os indivíduos do grupo escolhido. Dessa forma indivíduos com *fitness* mais elevado terão maior possibilidade de serem selecionados. O *tournament* deve ser aplicado duas vezes para determinar dois indivíduos para a posterior utilização do *crossover*. O parâmetro N pode ser variado entre 1 e o tamanho da população. Se N é igual a 1, todos os indivíduos da população possuem a mesma probabilidade de seleção, não importando o valor do seu *fitness*, sendo que, neste caso tem-se uma seleção completamente aleatória. Se N é o tamanho da população, o melhor indivíduo dessa sempre será selecionado. Estes são os casos extremos, porém, normalmente se utiliza um valor de $N = 2$ (CLAUMANN, 1999).

4.8.2 Crossover

O operador de *crossover* é o responsável pela combinação de características dos pais durante a reprodução, permitindo que as próximas gerações herdem essas características. Ele é considerado o operador genético mais importante, sendo aplicado com probabilidade dada por uma taxa de *crossover*. Quando se utilizam valores próximos a um para a taxa de *crossover* tem-se, na maior parte dos casos, a geração de filhos cujos genes são obtidos a partir da

combinação dos pais. No outro extremo, para uma taxa de *crossover* próxima a zero, os filhos serão, em sua grande maioria, idênticos aos pais. Em geral, utilizam-se valores altos para este parâmetro, como por exemplo 0.95, pois valores pequenos tendem a diminuir a eficiência do Algoritmo Genético sem melhorar os resultados finais da otimização.

As formas de utilização desse operador são apresentadas nos sub-itens a seguir.

4.8.2.1 *Crossover de Um Ponto*

Um ponto de cruzamento, chamado ponto de corte ou ponto de *crossover*, é sorteado aleatoriamente e a partir deste ponto as informações genéticas dos pais serão trocadas. As informações anteriores a este ponto em um dos pais são ligadas às informações posteriores a este ponto no outro pai. Um exemplo é mostrado na Figura 4.3 (UEM, 2004).

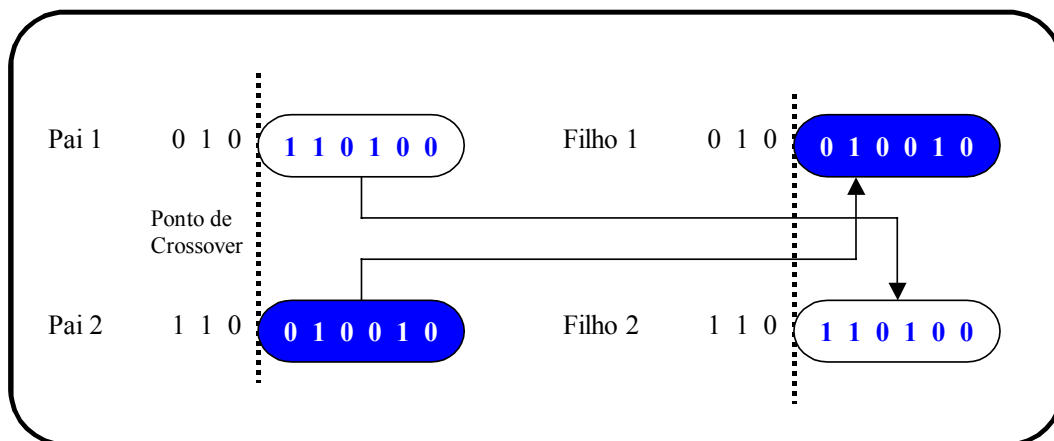


Figura 4-3 Ilustração do funcionamento do *crossover* 1-ponto

4.8.2.2 *Crossover Multi Ponto*

É uma generalização desta idéia de troca de material genético através de pontos, onde muitos pontos de cruzamento podem ser utilizados (UEM, 2004).

4.8.2.3 *Crossover Uniforme*

Este operador gera apenas um filho a partir de dois pais, utilizando uma probabilidade de 50% de que qualquer *bit* no filho provenha do primeiro pai, caso contrário o *bit* provém do segundo pai. Uma derivação deste é o *crossover parametrizado uniforme*, que não utiliza pontos de cruzamento, mas determina através de um parâmetro global qual a probabilidade de cada variável ser trocada entre os pais. A definição deste parâmetro em 1 resulta em um filho igual ao primeiro pai, e definindo-o em 0 resulta um filho idêntico ao segundo pai. Este parâmetro pode aceitar qualquer valor no intervalo $[0,1]$ para obter o *grau* de mistura desejado entre os pais (CLAUMANN, 1999).

4.8.2.4 *Crossover PMX*

Esse operador é chamado *Partially-Matched Crossover*. Dados os cromossomos pais, o operador copia uma *substring* de um dos pais diretamente na mesma posição do filho. As posições restantes se completam com os valores que ainda não tenham sido utilizados na mesma ordem em que se encontram em um dos pais (UEM, 2004).

4.8.3 **Mutação**

Os operadores de mutação são necessários para a introdução e manutenção da diversidade genética da população, alterando arbitrariamente um ou mais componentes de uma estrutura escolhida, fornecendo assim, meios para a introdução de novos elementos na população. Dessa forma, a mutação assegura que a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca nunca será zero. O operador de mutação é aplicado aos indivíduos com uma probabilidade dada pela taxa de mutação. Geralmente se utiliza uma taxa de mutação pequena, pois é um operador genético secundário.

O operador de mutação utilizado no *AGG* é a mutação *uniforme*, sendo que, cada gene recebe uma probabilidade (taxa de mutação) para que esse operador seja aplicado. Dessa forma, deve-se percorrer a cada geração todos os *bits* de todas as *strings* da população, e para cada um deles decidir, por sorteio, se a mutação deve ou não ser aplicada. Em caso afirmativo, troca-se o valor do *bit* como mostrado na Figura 4.4. Normalmente, valores de taxa de mutação de 1% são adequados para a maioria dos problemas. Deve-se tomar cuidado para não utilizar a taxa de mutação elevada demais, transformando o Algoritmo Genético em um método enumerativo (CLAUMANN, 1999).

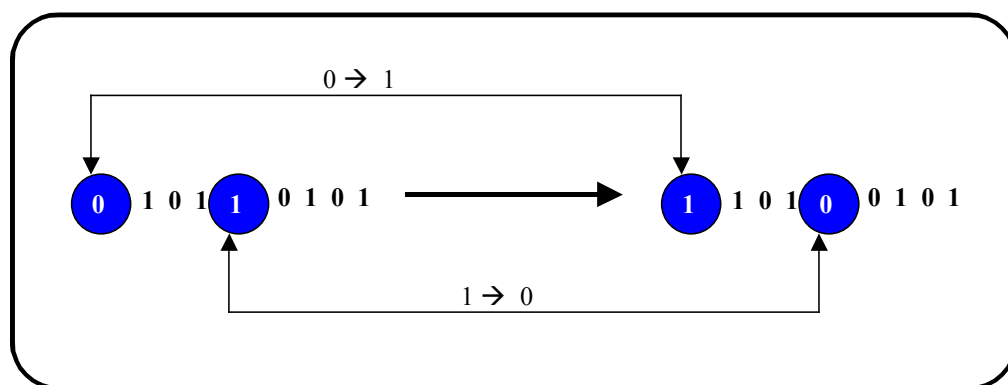


Figura 4-4 Mutação ocorrida em um gene da *string*

4.8.4 Escalonamento

O escalonamento é um operador que tem por função manter a competição entre os indivíduos de uma população a níveis aceitáveis, através do mapeamento e controle dos valores de *fitness*. É utilizado no início e final da otimização. No início, o procedimento de seleção por roleta, pode selecionar muitas vezes o mesmo indivíduo (super indivíduos), levando o método a uma convergência prematura. No final, pode-se ter os “fitness” de todos os indivíduos da população muito próximos, tornando o método enumerativo.

Diversos métodos de escalonamento são encontrados na literatura. São apresentados a seguir os tipos mais comuns, conforme descrito por CLAUMANN (1999).

4.8.4.1 Truncamento Sigma

Neste operador utiliza-se a variância da população para transformar o *fitness*, como mostrado na equação (4.1).

$$F = \max [f - (f_{med} - c \cdot \sigma), 0] \quad (4.1)$$

onde: $F = fitness$ escalonado; $f = fitness$ natural; $f_{med} = fitness$ médio da população; $c =$ constante normalmente entre 1 e 3; $\sigma =$ variância da população; e $\max =$ o maior entre $[f - (f_{med} - c \cdot \sigma)]$ e 0.

4.8.4.2 Escalonamento Linear

Definindo o *fitness* natural f e o *fitness* escalonado F . O escalonamento *linear* relaciona F a f de acordo com a equação (4.2):

$$F = a f + b \quad (4.2)$$

Os coeficientes a e b podem ser escolhidos de diversas formas, entretanto o *fitness* escalonado médio F_{med} é normalmente igualado ao *fitness* natural médio f_{med} (equação 4.3).

$$F_{med} = f_{med} \quad (4.3)$$

Para calcular os dois coeficientes da equação (4.2) deve-se definir outra relação. A mais utilizada é a seguinte:

$$F_{max} = C_{mult} f_{med} \quad (4.4)$$

Onde: C_{mult} é um valor constante maior que um ;

F_{max} é o *fitness* escalonado do melhor indivíduo da população.

Para populações pequenas (50 a 100 indivíduos) $C_{mult} = 1,2$ a 2 tem sido utilizado com sucesso.

Próximo ao final da otimização, os indivíduos da população podem ter *fitness* muito semelhantes. Nesta situação, o escalonamento aumenta a diferença entre o *fitness* do pior, médio e do melhor de modo a evitar que a otimização se torne uma pesquisa enumerativa.

A aplicação do escalonamento linear é dificultada quando algumas *strings* estão bem abaixo da média da população, porém o *fitness* médio está próximo do máximo. Se o escalonamento é aplicado nesta situação, o alargamento requerido para separar os médios dos bons fará que as *strings* ruins tenham valores negativos após o escalonamento. Quando ocorre esta situação, mantém-se o *fitness* natural médio igual ao *fitness* escalonado médio, porém mapeia-se o mínimo *fitness* natural para o *fitness* escalonado = 0. Dessa forma os parâmetros contidos no escalonamento *linear* deverão ser calculados a partir das relações (4.5) e (4.6).

$$F_{med} = f_{med} \quad (4.5)$$

$$F_{min} = 0 \quad (4.6)$$

onde: F_{min} = é o *fitness* do pior indivíduo da população.

O escalonamento *linear* pode não funcionar adequadamente quando há diferenças significativas entre o *fitness* do pior, médio e melhor indivíduo da população, ou seja, nas seguintes situações: quando o *fitness* do menor está bem abaixo da média mas o *fitness* médio está próximo do máximo ou, de forma contrária, quando o *fitness* do menor está próximo da média mas o *fitness* do médio está distante do melhor. O primeiro caso, já descrito acima, é

resolvido modificando as relações utilizadas para o cálculo dos coeficientes da equação do escalonamento. Esta medida evita a atribuição de *fitness* negativos aos piores indivíduos. No entanto, o escalonamento *linear* atribuirá um valor de *fitness* para os indivíduos próximos a média praticamente igual ao do melhor. No segundo caso, o *fitness* escalonado do pior ficará ainda mais próximo do médio. Nos dois casos percebe-se que o escalonamento *linear* tem dificuldades de explicitar, de modo adequado, a diferença entre os indivíduos. Este comportamento tende a diminuir a eficiência do algoritmo genético, pois um *fitness* praticamente igual é atribuído a indivíduos que possuem desempenhos diferentes.

4.8.4.3 Escalonamento Bilinear

O escalonamento *bilinear* é semelhante ao *linear*. A diferença está na utilização de uma equação linear para escalonar o *fitness* dos indivíduos superiores a média e outra para os indivíduos inferiores. Esta modificação tem por objetivo minimizar os problemas que o escalonamento *linear* pode apresentar quando há diferenças significativas entre o desempenho do pior, médio e melhor indivíduo da população.

De modo análogo ao *Linear* calculam-se os coeficientes da equação de escalonamento (4.2) a partir das relações (4.3) e (4.4). A equação (4.4) deve ser utilizada para o escalonamento do *fitness* dos indivíduos com desempenho superior ao médio. Para escalonar o *fitness* dos indivíduos com desempenho inferior ao médio utilizam-se as equações (4.7), (4.8) e (4.9):

$$F = a*f + b* \quad (4.7)$$

$$F_{med} = f_{med} \quad (4.8)$$

$$F_{min} = C_{min} f_{med} \quad (4.9)$$

Onde: C_{min} é o número de cópias esperadas para o pior indivíduo da população. Um valor de C_{min} em torno de 0,01 forneceu bons resultados em testes usados por Claumann (1999).

4.8.5 Elitismo

O elitismo foi inicialmente introduzido em 1975 por Kenneth De Jong e é um melhoramento de muitos métodos de seleção que forçam o Algoritmo Genético a reter um determinado número dos melhores indivíduos em cada geração (MELANIE, 1998).

O modelo de seleção elitista normalmente é acoplado a outros métodos de seleção, na tentativa de se aumentar a velocidade de convergência do algoritmo, bem como em aplicações onde possa ser necessário o seu emprego.

Este processo simplesmente copia os N ($N \geq 1$) melhores indivíduos da população corrente para a próxima geração, garantindo que estes cromossomos não sejam destruídos nas etapas de recombinação e mutação.

Na maioria das implementações, pelo menos o elitismo do melhor indivíduo é utilizado.

A principal vantagem do elitismo é garantir que não se perca o melhor indivíduo durante o processo evolutivo e, com isto, gerar uma seqüência monotônica, onde o resultado não piora.

Sua desvantagem é a possibilidade de forçar a busca, pela presença de mais uma cópia do melhor indivíduo, na direção de algum ponto ótimo local que tenha sido descoberto antes do global, embora um algoritmo genético possa escapar de tais armadilhas.

Uma alternativa é guardar separadamente a melhor solução encontrada durante a evolução, para no final da execução designá-la como o indivíduo ótimo encontrado, mesmo que ele não esteja presente na última geração da execução.

O número de indivíduos repassados deve ser uma pequena fração da população pois um elitismo elevado pode levar a convergência prematura do Algoritmo Genético. O valor recomendado está em torno de 5 a 10 % da população.

4.9 Algoritmos Genéticos em Codificação Real

4.9.1 Introdução

Os Algoritmos Genéticos, na sua forma mais simples, trabalham normalmente com uma representação binária (zero-um) para associar uma solução ou componentes de uma solução do problema abordado.

Embora esta representação tenha se mostrado eficiente para vários problemas, observou-se a medida que foram crescendo as aplicações de *AGs*, que em diversos problemas com um elevado número de restrições, esta representação pode não ser a mais adequada, surgindo daí alternativas como a representação por números inteiros ou reais, onde um cromossomo é descrito por um vetor desses números (OCHI, 2002).

Independentemente do tipo de representação selecionada, devemos sempre verificar se a representação está corretamente associada com as soluções do problema analisado. Ou seja, que toda solução tenha um cromossomo associado e reciprocamente que todo cromossomo gerado pelo Algoritmo Genético esteja associado a uma solução válida do problema analisado.

Um exemplo em que a representação binária não é a mais adequada é mostrado através do Problema do Caixeiro Viajante (PCV). Se existirem $n=5$ cidades ($N=\{1,2,3,4,5\}$), onde a cidade de origem é dada por $i=1$, uma solução viável do tipo $S = (1,2,3,4,5)$ pode ser representada por um vetor de cromossomo da forma: $p=(001;010;011;100;101)$, onde cada gene (posição) do cromossomo p está associado a um número inteiro de um a cinco codificado na forma binária. A dificuldade deste tipo de representação é no momento de gerar novos cromossomos viáveis. O *AG* poderia gerar soluções contendo seqüências de três bits tais como: 000; 111; 110 representando respectivamente os números inteiros: 0,7,6 que não estão associados a soluções válidas deste PCV, pois $n=5$ cidades. Neste exemplo é recomendável um Algoritmo Genético não convencional, com representação de números inteiros (OCHI, 2002).

Além disso, a codificação binária pode gerar *strings* muito grandes na representação de problemas multivariáveis, sendo que, a aplicação dos operadores genéticos *bit a bit* demandará um elevado tempo computacional. Para minimizar este problema pode-se trabalhar diretamente com operadores para números reais. Além do menor comprimento de *strings*, a codificação real apresenta outras vantagens em relação à codificação binária, como as citadas por CLAUMANN (1999):

- a) Para um ser humano é mais natural do que uma cadeia de *bits*.
- b) Na codificação real não há necessidade de conversões de *strings* para avaliação da função objetivo, pois cada gene corresponde a uma variável. Em codificação binária, vários genes (*bits*) são utilizados para representar uma única variável;
- c) O limite de precisão da solução obtida em codificação real é o da precisão da máquina. Em codificação binária este limite é baseado no número de *bits* utilizados na representação das variáveis;
- d) cromossomos compactos e com melhor precisão numérica;
- e) A utilização de codificação real permite um maior controle em relação à ação dos operadores genéticos nas *strings*, pois cada gene representa uma variável. No caso da codificação binária, a aplicação dos operadores genéticos nas *strings* produz modificações nos fenótipos que são difíceis de serem previstas;
- f) Permite larga variedade de operadores.

Pelas vantagens descritas acima e por ser a solução do problema proposto neste trabalho composta por variáveis reais e restritas como tipo de resíduo, temperatura e tempo de batelada, neste estudo será utilizado um Algoritmo Genético em codificação real.

4.9.2 Operadores Genéticos em Codificação Real

Os operadores genéticos, em codificação real, que devem ser alterados, em relação à codificação binária, são aqueles que trabalham em nível das *strings*, ou seja, o *crossover* e a mutação, mantendo-se invariantes os operadores de seleção, escalonamento e elitismo. A seguir, os operadores *crossover* e mutação serão descritos baseados em CLAUMANN (1999).

4.9.2.1 Crossover

As principais diferenças do *crossover* em codificação real em relação à binária, é que em codificação real os genes são as próprias variáveis do problema e não bits, além da codificação real apresentar maior flexibilidade na operação dos genes, não se limitando a simples cópia e troca de bits.

Nesse trabalho é proposto o operador de *crossover*: intermediário interpolador e extrapolador com controle de extrapolação.

Crossover intermediário interpolador: Neste *crossover* cada gene de um filho é gerado de acordo com a equação (4.10):

$$\text{Filho}[i] = \text{pai}_1[i] + \alpha (\text{pai}_2[i] - \text{pai}_1[i]) \quad (4.10)$$

onde: i = posição na *string* variando entre $[1, \text{comprimento da string}]$, $\text{Filho}_1[i]$, $\text{filho}_2[i]$ = Valor do i -ésimo gene no primeiro e segundo filhos, $\text{Pai}_1[i]$, $\text{Pai}_2[i]$ = Valor do i -ésimo gene no primeiro e segundo pais e $0 \leq \alpha \leq 1$. Essa variáveis são as mesmas usadas para *crossover* intermediário extrapolador, descrito a seguir.

Crossover intermediário extrapolador: Nesse caso, o Filho_1[i] é gerado por interpolação dos pais conforme equação 4.10. Porém, cada gene do segundo filho, Filho_2[i], é gerado como mostrado abaixo:

Se $fitness_pai_1 > fitness_pai_2$, então:

$$Filho_2[i] = pai_1[i] + \alpha (pai_1[i] - pai_2[i]) \quad (4.11)$$

Se $fitness_pai_1 < fitness_pai_2$, então:

$$Filho_2[i] = pai_2[i] + \alpha (pai_2[i] - pai_1[i]) \quad (4.12)$$

O Filho_2[i] pode representar uma solução fora da faixa de interesse, ou seja, acima do limite superior [i] ou abaixo do limite inferior[i], principalmente nas primeiras gerações, devido à grande diversidade da população. Nesse caso, dizemos que houve uma extrapolação. Para evitar a divergência do Algoritmo Genético foi utilizado conjuntamente um procedimento para controlar a extrapolação, conforme descrito abaixo.

Procedimento para controlar a extrapolação: esse procedimento verifica se os genes da *string* do filho gerado (Filho_2[i]) estão dentro da faixa de interesse da otimização, se estiver, nenhuma correção é aplicada à *string*, caso contrário, cada gene que ultrapassou a faixa de otimização recebe um novo valor entre o limite ultrapassado (inferior ou superior) e o respectivo valor do gene contido no pai mais próximo, conforme mostrado pelas equações 4.13 a 4.16.

Se for válida da equação 4.11, então:

Se $Filho_2[i] > limite_superior[i]$,

$$Filho_2[i] = pai_1[i] + \alpha (limite_superior[i] - pai_1[i]) \quad (4.13)$$

Se $Filho_2[i] < limite_inferior[i]$,

$$Filho_2[i] = pai_1[i] + \alpha (limite_inferior[i] - pai_1[i]) \quad (4.14)$$

Se for válida da equação 4.12, então:

Se $Filho_2[i] > limite_superior[i]$,

$$Filho_2[i] = pai_2[i] + \alpha (limite_superior[i] - pai_2[i]) \quad (4.15)$$

Se $Filho_2[i] < limite_inferior[i]$,

$$Filho_2[i] = pai_2[i] + \alpha (limite_inferior[i] - pai_2[i]) \quad (4.16)$$

4.9.2.2 Mutação

As diferenas entre a mutao em codificao binária e real são as mesmas citadas para a mudana de codificao no caso do operador de *crossover*.

Será descrita a seguir a mutao uniforme, utilizada neste trabalho, mas existem outros operadores de mutao em codificao real, como por exemplo a mutao exponencial e por deslocamento.

Mutao uniforme: Este operador substitui o conteúdo de cada gene em que atua por um valor aleatório dentro da faixa de otimizao. Para evitar que a otimizao se torne um

procedimento enumerativo atribui-se uma probabilidade pequena para a taxa de mutação (normalmente 1%).

Um fluxograma mostrando a estrutura do Algoritmo Genético em codificação real, com seus operadores convencionais, além do elitismo e do escalonamento é mostrado na Figura 4.5.

No próximo capítulo é descrita a metodologia adotada para alcançar os objetivos propostos no Capítulo 2, dividida em três partes principais: caracterização da região de estudo, aquisição *on line* de dados experimentais, e modelagem e otimização do sistema.

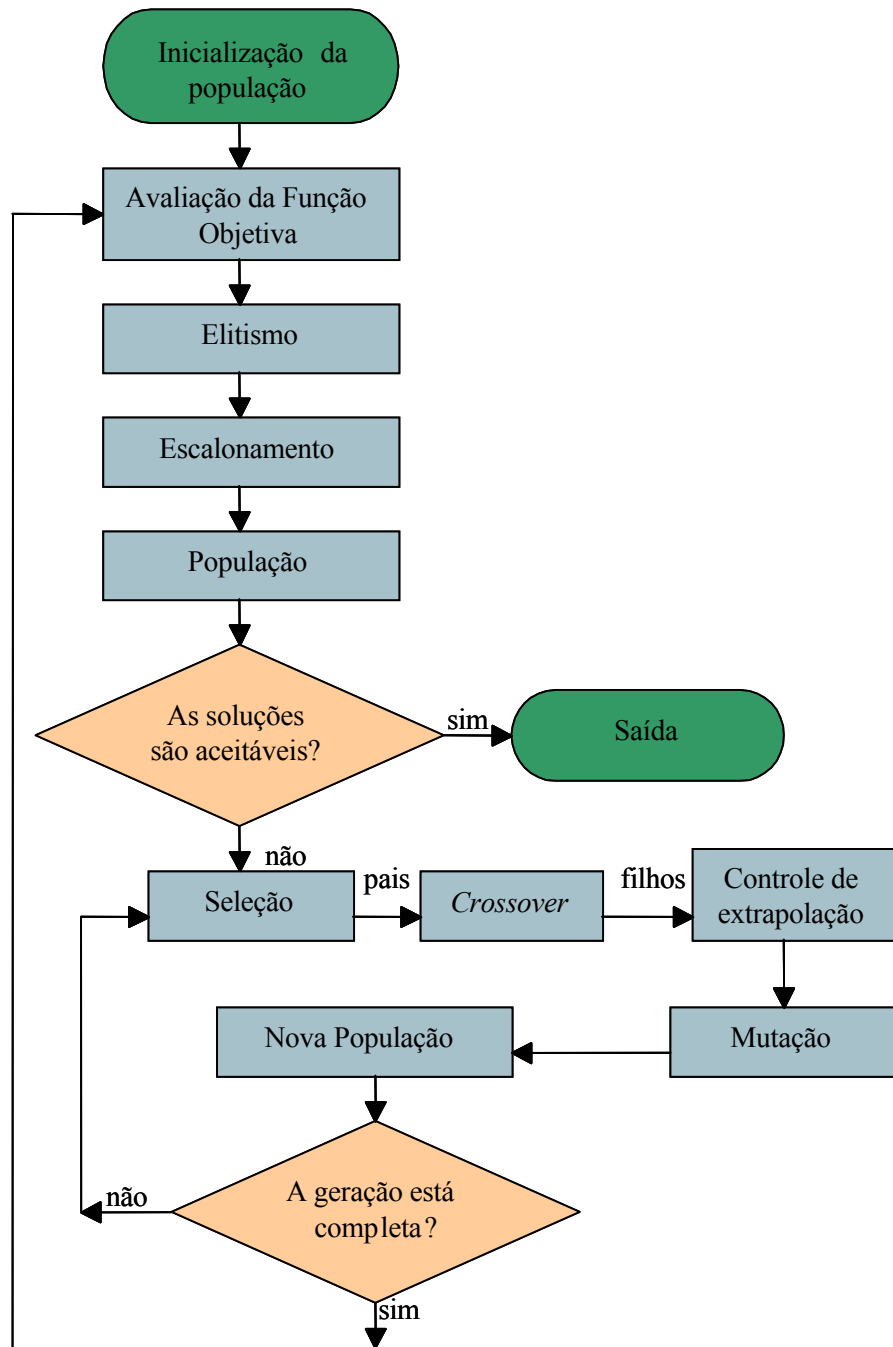


Figura 4-5 Fluxograma do algoritmo genético em codificação real

Capítulo 5

Metodologia

A primeira etapa do processo de otimização de uma planta de pirólise de resíduos sólidos industriais consiste na caracterização da região de inserção da planta, visando determinar os tipos de resíduos a serem processados, a taxa média de geração e a capacidade dos equipamentos. Após estudo dos princípios de funcionamento desses equipamentos, dois aparatos experimentais, distintos somente por suas dimensões físicas, consistindo de um reator, separador *flash*, cromatógrafo e sistema de aquisição de dados, foram utilizados para coletar dados de temperatura e tempo de batelada, tensão elétrica consumida pela reação, massa e composição dos produtos resultantes da pirólise de três tipos de resíduos sólidos industriais. Essas variáveis foram utilizadas para modelar o rendimento dos produtos, o consumo e a produção de energia da reação, além de servirem para a classificação dos óleos obtidos. Esses modelos foram incorporados ao modelo de planta batelada multiprodutos, integrando planejamento de produção, *scheduling* e supervisão. A Figura 5.1 mostra um fluxograma representativo da metodologia utilizada e os itens 5.1 a 5.7 descrevem as principais etapas envolvidas.

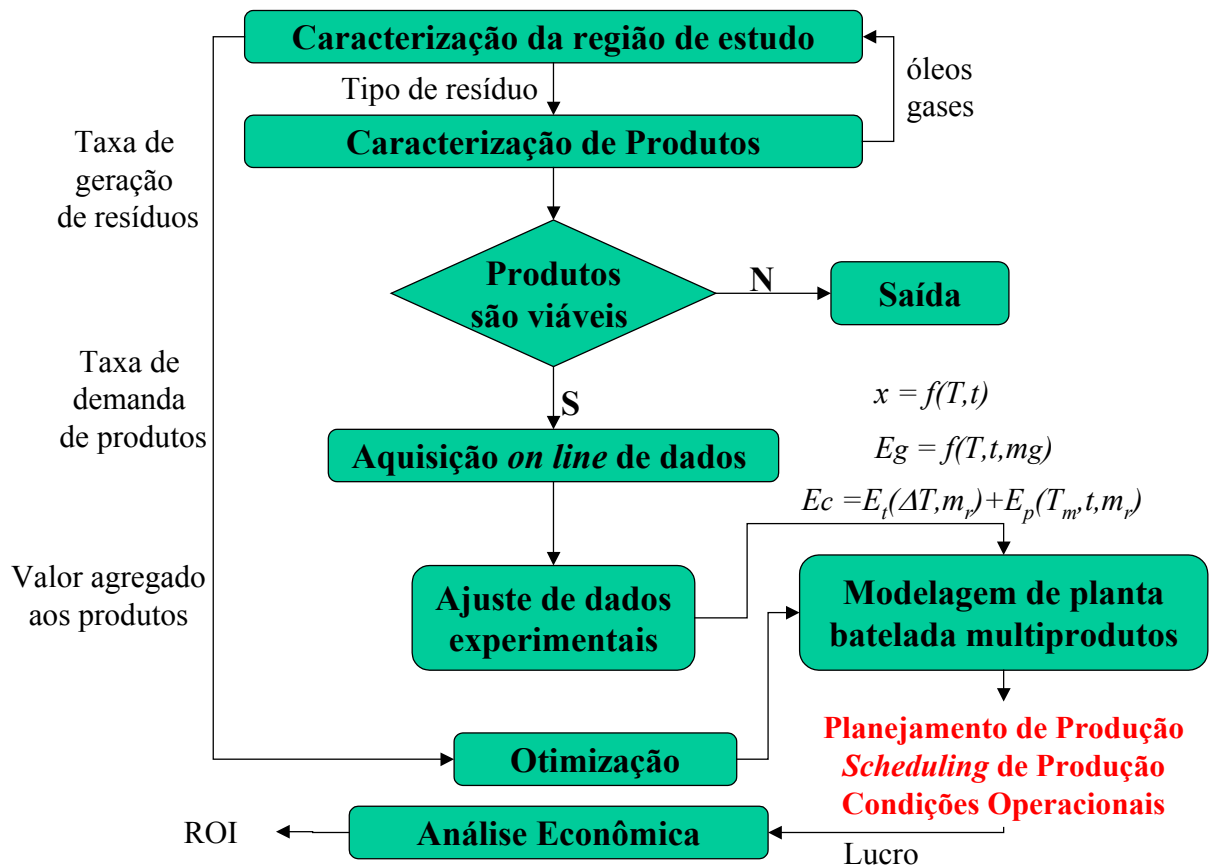


Figura 5-1 Fluxograma representativo da metodologia utilizada

5.1 Caracterização da Região de Estudo

Foi realizada ampla pesquisa bibliográfica e *in loco* das características da região onde pretende-se montar a planta de pirólise, ou seja, a cidade de Caxias do Sul. Esta etapa envolveu a participação de diversos órgãos governamentais, bem como universidades e empresas públicas e privadas. Essa pesquisa foi dividida em dados macro e microscópicos. Os macroscópicos incluem dados gerais que caracterizam o município como: o número de habitantes e de indústrias; o PIB; a renda per capita anual; e a composição da economia industrial por setor de

atividade. A obtenção de dados microscópicos consistiu no inventário dos resíduos sólidos industriais no município através de visitas a diversas empresas geradoras de resíduos, recicladoras de resíduos e recuperadoras de solventes, aterros e revisão bibliográfica em órgãos ambientais extintos e atuantes. Com esse estudo, foi possível determinar os tipos de resíduos a serem estudados, em função do volume gerado e do seu grau de periculosidade, bem como determinar a taxa média de geração desses resíduos, necessária para o projeto de uma planta piloto de pirólise de resíduos sólidos industriais.

5.1.1 Matérias Primas

Foram utilizadas como matérias-primas os seguintes resíduos sólidos industriais:

1. Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)
2. “Borra de tinta” de origem Poliuretânica (NR5)
3. Polipropileno (PP)

Esses resíduos foram escolhidos tanto pelo volume gerado quanto pelo seu grau de periculosidade, compondo o grupo dos principais causadores de poluição ambiental dentre os resíduos sólidos industriais na região de estudo.

5.2 Caracterização de Produtos

A primeira fase da etapa de caracterização de produtos foi o desenvolvimento do projeto, montagem e entendimento dos princípios de funcionamento de cada equipamento pertencente aos sistemas de reação e de análise. Em seguida, procedeu-se a coleta e análise de dados experimentais realizada em dois aparatos experimentais distintos. O primeiro sistema experimental, de menor escala, foi destinado a coleta de produtos para caracterização química,

determinação do rendimento dos óleos produzidos e da energia gerada pelos gases da reação. Um segundo aparato, em maior escala, foi usado para aquisição *on line* de dados de tempo, temperatura e tensão elétrica para posterior modelagem da energia consumida durante a reação, energia absorvida pela reação (endotérmica) e energia perdida pelo reator para o meio externo, além de servir para a coleta dos óleos usados nos ensaios de classificação de óleos. Os desenhos esquemáticos das Figuras 5.2 e 5.3 mostram os dados coletados (caixas amarelas) e as variáveis modeladas (caixas azuis) a partir dos dois aparatos experimentais construídos.

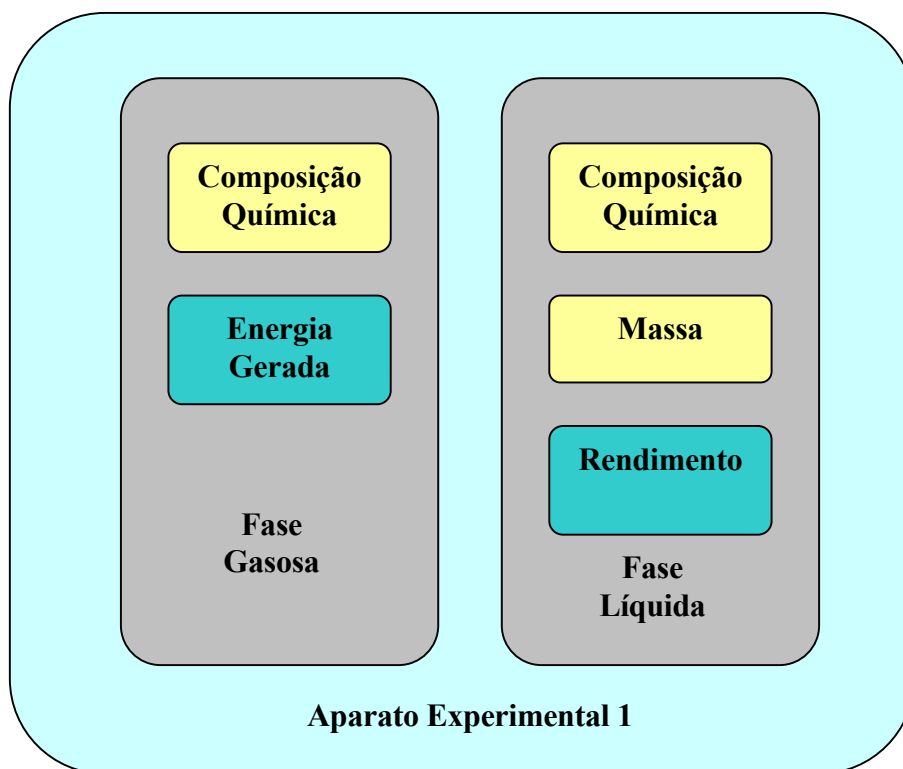


Figura 5-2 Dados coletados e variáveis modeladas a partir do aparato experimental 1

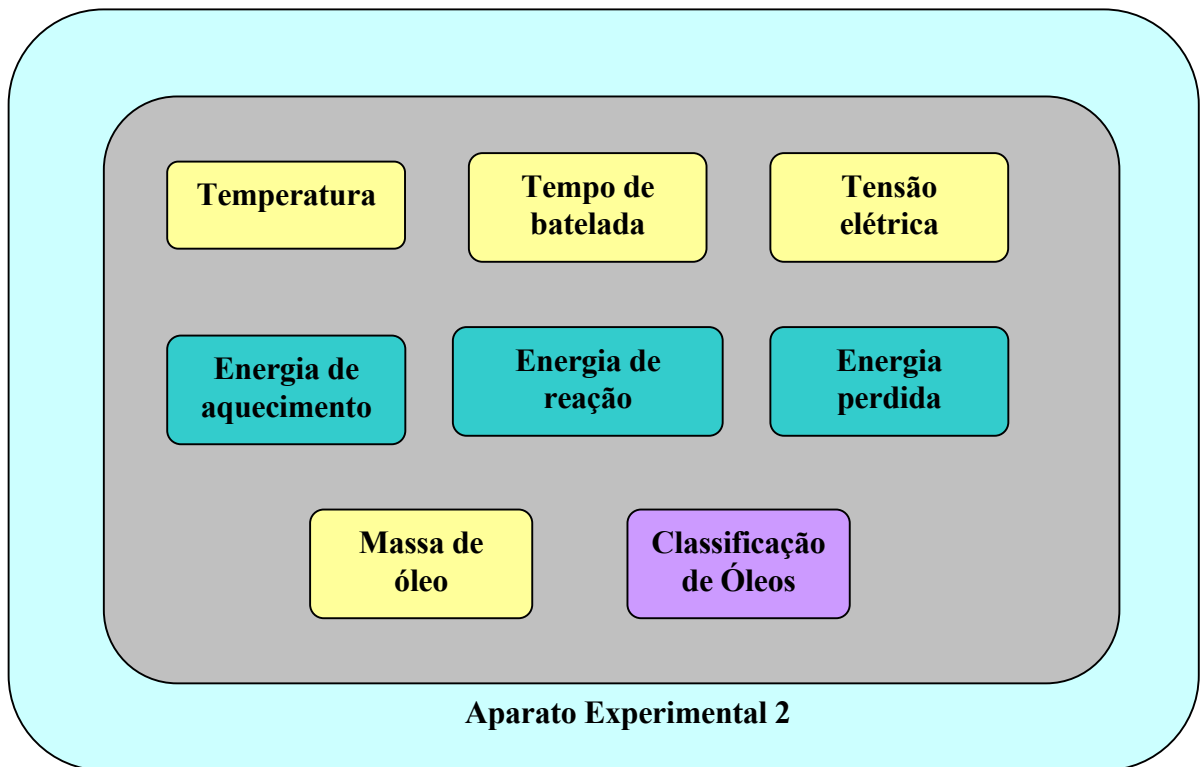


Figura 5-3 Dados coletados e variáveis modeladas a partir do aparato experimental 2

5.2.1 Equipamentos do Aparato Experimental

Dois aparatos experimentais compostos por reator, separador *flash* e sistema de aquisição de dados foram construídos: o primeiro em menor escala, denominado retorta, foi utilizado para a caracterização química e para a determinação do rendimento dos produtos líquidos resultantes da reação, baseado no procedimento experimental realizado pela PETROBRAS (ENSAIO FISCHER, 2002); um segundo reator pirolítico foi construído com volume aproximadamente 10 vezes maior que o primeiro foi utilizado na aquisição de dados térmicos usados para a modelagem e predição da energia necessária para aquecer os produtos até a temperatura da reação, energia necessária para manter a temperatura da reação, entalpia da

reação e energia perdida pelo reator em função da massa de resíduo, temperatura e tempo de batelada, uma vez que a retorta não foi sensível à variação de massa de resíduo carregada.

O sistema de análise de produtos foi composto por cromatógrafos à gás com detector de condutividade térmica e ionização de chama para a determinação da composição dos produtos gasosos e líquidos, respectivamente. A fase líquida obtida foi ainda submetida a ensaios de acordo com normas da Agência Nacional do Petróleo (ANP) para classificação de óleos combustíveis no Brasil. Esses ensaios utilizaram os seguintes equipamentos: calorímetro, viscosímetro, densímetro e equipamento para a determinação do ponto de fulgor.

Os equipamentos de proteção individual e de segurança foram considerados parte do aparato experimental da planta de pirólise, incluindo guarda-pó, luvas de látex, óculos de segurança, protetor auricular e máscara contra vapores orgânicos, além de outros equipamentos de segurança como extintor de incêndio, válvula de alívio de pressão e exaustor.

5.2.2 Descrição do Processo

O processo de pirólise foi realizado no Laboratório de Reatores do Departamento de Engenharia Química da Universidade de Caxias do Sul e um fluxograma representativo é mostrado na Figura 5.4. O reator funciona em batelada e é alimentado com resíduo e descarregado através da abertura de uma tampa na sua parte superior. A pressão é medida por um manômetro tipo Bourdon acoplado com serpentina de aço inox para dispersão do calor, localizado na parte superior do reator e a temperatura, através de um termopar tipo J, inserido num poço central ao reator. O termopar é ligado ao controlador de temperatura através de um condicionador de sinal e placa de aquisição de dados marca “Computer Boards” modelo Cio-Das-Jr 08. O controle de temperatura é baseado em redes neuronais. A reação é conduzida na ausência de oxigênio, visando uma redução ou ausência de gases tóxicos oxigenados.

Ao término da reação os produtos saem pelo topo do reator, passando por uma válvula de expansão tipo agulha e sendo dirigidos para um separador *flash*. No topo do separador, gases da reação são coletados através de um sistema de vasos comunicantes, com dois balões e braçadeiras contendo uma solução confinante capaz de prender o gás em um deles, e pelo fundo do separador retira-se a fase líquida que é pesada e analisada por cromatografia gasosa com espectrômetro de massa acoplado. Os sólidos pós-pirólise foram analisados por infravermelho e raio X.

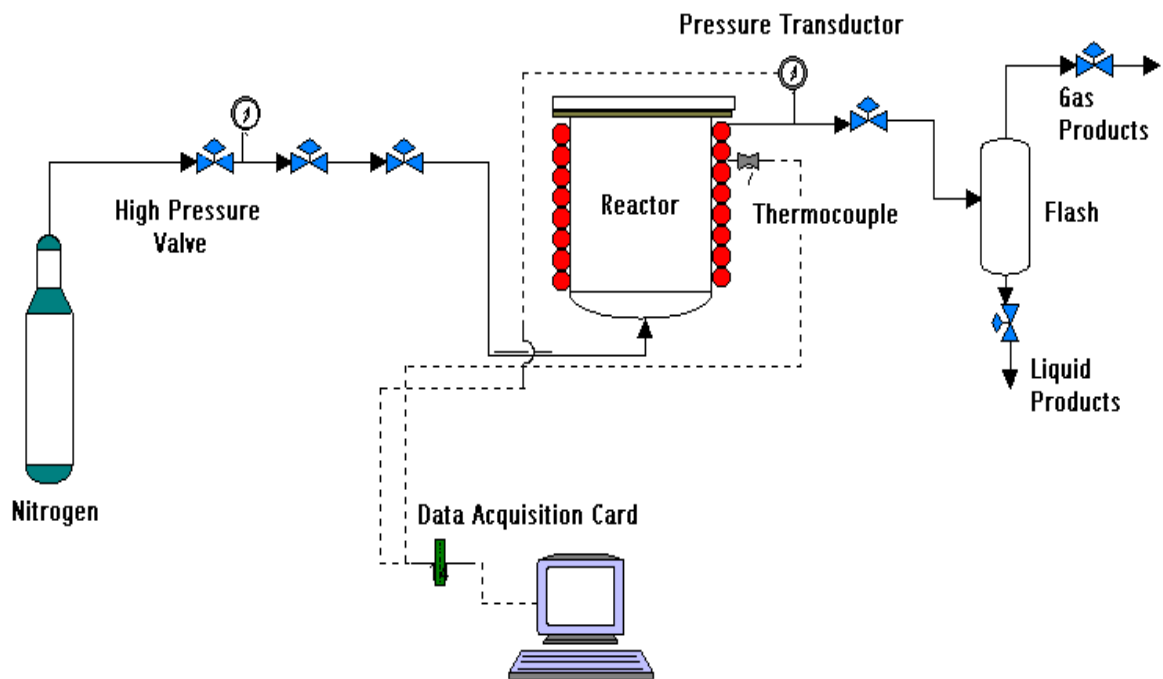


Figura 5-4 Fluxograma esquemático do processo de pirólise

5.2.3 Análise de Produtos

A Figura 5.5 mostra um esquema da estrutura analítica utilizada para análise de produtos líquidos, gasosos e sólidos obtidos do processo de pirólise.

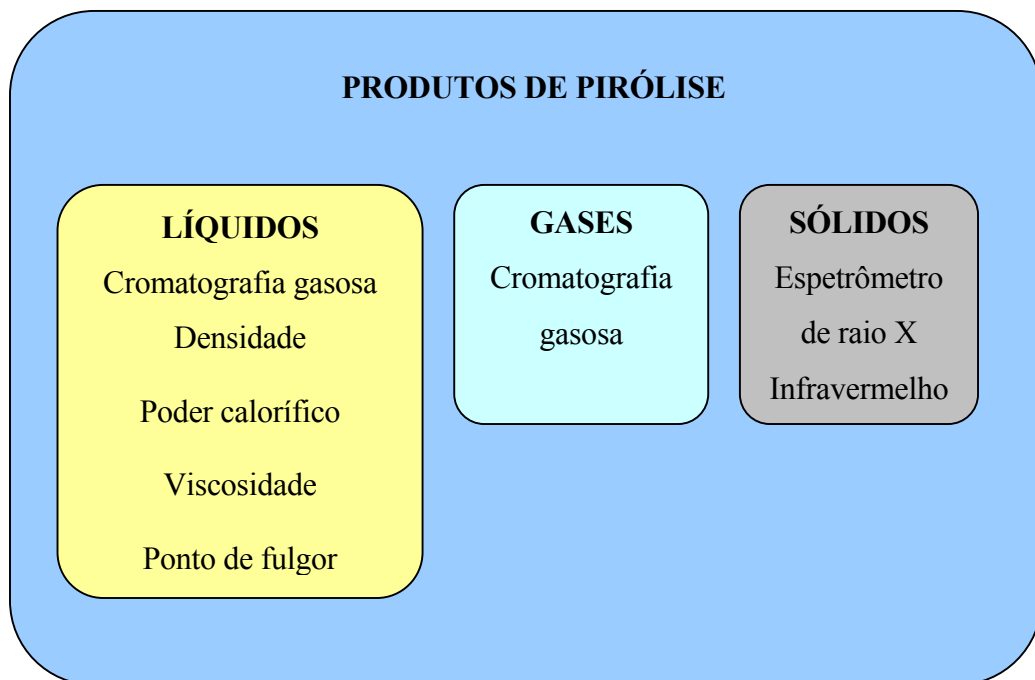


Figura 5-5 Estrutura analítica usada na análise de produtos

5.2.3.1 Óleos

A classificação e agregação de valor econômico aos óleos combustíveis produzidos está vinculada as normas da Agência Nacional do Petróleo, responsável pela comercialização de todos os óleos combustíveis dentro do território nacional. De acordo com a Portaria N°80 da ANP, os óleos são classificados conforme mostrado na Tabela 5.1, de acordo com algumas de suas características.

A composição do óleo foi obtida por cromatografia gasosa em um cromatógrafo de ionização de chama com espectrômetro de massa acoplado. O calor de combustão, a viscosidade cinemática, o ponto de fulgor e a densidade foram analisados de acordo com normas da ANP, mediante o emprego de Normas Brasileiras Registradas NBR e Métodos Brasileiros MB da Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT e dos métodos da

American Society for Testing and Materials ASTM, observando-se sempre as de publicação mais recente.

Tabela 5-1 Características dos óleos

| Características | Tipo E | Tipo W | Tipo L |
|------------------------------------|--------|--------|--------|
| Ponto de fluidez (°C) | +3 | -12 | -9 |
| Viscosidade a 54,4°C, cSt | 55 | 24 | 6 |
| Teor de enxofre, % | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Poder calorífico inferior, Kcal/kg | 9700 | 9800 | 9850 |
| Ponto de fulgor, °C | 85-90 | 70 | 66 |
| Densidade relativa, 20°C/ 4°C | 0,970 | 0,955 | 0,910 |

5.2.3.2 Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs)

Os produtos gasosos são formados por uma mistura de compostos orgânicos voláteis (VOCs).

Os gases da reação foram analisados por cromatografia gasosa. Conhecendo-se a quantidade produzida e a composição da fase gasosa, para cada experimento, foi possível a determinação do poder calorífico, calculado pelo programa “*Process Designer*” (2004), obtido na internet no site www.processassociates.com/process/tools.htm.

5.2.3.3 Resíduos Sólidos Pós Pirólise (“Char”)

Os produtos sólidos pós pirólise, “char”, foram analisados por espectrômetro de raio X e infravermelho e são compostos por metais, óxidos e material inerte, em concordância qualitativa com dados obtidos por GALVAGNO *et al.* (2002).

5.3 Aquisição *On Line* De Dados

A aquisição de dados foi realizada através das seguintes etapas: a temperatura foi medida através de um sensor tipo termopar inserido em um poço no centro do reator pirolítico. Esse sensor enviou um sinal a um condicionador capaz de transformar o sinal de saída do termopar de milivolts para 0 a 5 volts e enviá-lo para uma placa de aquisição de dados. O sinal foi lido por um *software* de aquisição de dados *Eclipse Windows* que realizou o controle da temperatura (variável controlada) utilizando redes neuronais e enviou um sinal para um módulo de potência capaz de transformá-lo em tensão elétrica de 0 a 220V (variável manipulada), alimentando uma resistência de aquecimento externa ao reator. Esse *software* ainda foi utilizado para armazenagem *on line* dos dados de temperatura, tempo de batelada e tensão elétrica para posterior análise.

5.4 Ajuste de Dados Experimentais

Com o histórico dos dados descritos no item 5.3. somado à análise e massa de produtos, foi possível modelar o rendimento de óleo, a energia gerada pelos gases da reação e as energias consumida, absorvida e perdida durante a reação em função da temperatura e tempo de duração de cada batelada. Todos os ajustes foram realizados através do *software* “*statistica*”, utilizando o método de otimização “Quasi-Newton” tendo como função objetiva a diferença entre os valores preditos e observados ao quadrado com um critério de convergência menor que 0,0001.

5.5 Modelagem de Planta Batelada Multiprodutos

O modelo adotado para planta batelada multiprodutos consiste em obter uma solução ótima para o problema do planejamento da produção, através da maximização de uma função lucro.

5.5.1 Características do modelo

Algumas características importantes deste modelo aplicado a pirólise, são:

- a) A receita é obtida não só pela venda de produtos, mas também através do cálculo e do computo do passivo ambiental;
- b) São considerados produtos para venda os óleos produzidos e o gás combustível remanescente da sua utilização na geração de energia para o sistema;
- c) 80% dos custos de manufatura foram considerados custos energéticos, por representarem os mais significativos custos de produção. Os outros 20% incluem custos com manutenção, mão-de-obra, distribuição e venda;
- d) O tempo de *setup* considera carga e descarga do reator e é igual para todos os resíduos.

5.5.2 Parâmetros e variáveis do modelo

A notação apresentada a seguir é usada para o modelo proposto.

Conjuntos:

$i = 1, \dots, R$ resíduos;

$j = 1, \dots, P$ produtos;

$t = 1, \dots, T$ períodos de tempo;

$k = 1, \dots, Nb_{it}$ bateladas do resíduo i no período de tempo t .

Parâmetros:

H_t = comprimento do período t ;

P_{it} = preço do resíduo i no período t ;

PP_{jt} = preço do óleo j no período t ;

C_t = custo unitário de gás combustível no período t ;

T_s = tempo de *setup*;

$Tmax_i$ = temperatura máxima para processar o resíduo i ;

$Tmin_i$ = temperatura mínima para processar o resíduo i ;

$tmax_i$ = tempo máximo para processar o resíduo i ;

$tmin_i$ = tempo mínimo para processar o resíduo i ;

$Dmax_j$ = demanda máxima de produtos gerados pelo resíduo i ;

$Dmin_j$ = demanda mínima de produtos gerados pelo resíduo i ;

$Omax_i$ = oferta máxima de resíduo i .

Variáveis:

QR_{it} = quantidade de resíduo i processado no período t ;

QP_{jt} = quantidade de produto j gerado no período t ;

GL_t = massa líquida de gás combustível no período t ;

CTP_t = custo total de produção no período t ;

t_i = tempo de uma batelada do resíduo i ;

t_{Ri} = tempo de reação do resíduo i ;

T_{Ri} = temperatura de reação do resíduo i .

O rendimento de produtos e as energias, consumida e gerada, associadas à reação de pirólise influenciam diretamente sobre QR_{it} , QP_{jt} , GL_t e CTP_t . Os modelos de rendimento e

energia foram determinados a partir de ajustes de dados experimentais usando o *software* “*statistica*”, com o método de otimização “Quasi-Newton”, tendo como função objetiva a diferença entre os valores preditos e observados ao quadrado com um critério de convergência menor que 0,0001.

5.5.2.1 Massa líquida de gás combustível (GL_t)

A massa líquida de gás combustível no período t é dada pela equação:

$$GL_t = \sum_{i=1}^R (GP_{it} - GC_{it}) \quad (5.1)$$

Onde:

GP_{it} = massa de gás combustível produzida a partir do resíduo i no período t ;

GC_{it} = massa de gás combustível consumida no processamento do resíduo i no tempo t .

A massa de gás combustível produzida é determinada através do rendimento da reação, enquanto a consumida é aquela necessária para suprir o requerimento energético da reação. Essa energia é composta pela soma de duas parcelas: a energia necessária para elevar a temperatura inicial do resíduo até a temperatura da reação, denominada aqui de energia transiente; e pela energia necessária para manter a temperatura da reação, chamada energia permanente. Com referência à temperatura inicial da reação, no processamento da primeira batelada do dia, essa temperatura é a temperatura de alimentação do resíduo, porém, após a primeira batelada, o reator encontra-se quente, de forma que a partir da segunda batelada, alimentando-se o resíduo na temperatura ambiente, acaba-se por atingir uma nova temperatura, aqui denominada temperatura no novo estado estacionário, determinada aplicando um balanço de energia macroscópico e permanente no sistema reator-resíduo, conforme equação abaixo:

$$TNEE_i = \frac{(m_{RE} cp_{RE} T_{RE}) + (m_i cp_i T_{Ai})}{(m_{RE} cp_{RE} + m_i cp_i)} \quad (5.2)$$

Onde:

$TNEE_i$ = temperatura do resíduo i no novo estado estacionário;

m_{RE} = massa do reator (aço inoxidável 316);

cp_{RE} = calor específico do aço inoxidável 316;

T_{RE} = Temperatura do reator;

m_i = massa do resíduo i ;

cp_i = calor específico do resíduo i ;

T_{Ai} = temperatura de alimentação do resíduo i .

80% do custo total de produção no período t foi definido como sendo custo com gás combustível produzido neste período. Os outros 20% são referentes à manutenção, mão-de-obra e custos com distribuição e venda. Portanto, o CTP_t pode ser equacionado como mostrado pela equação 5.3.

$$CTP_t = 1,25 \sum_{i=1}^R GP_{it} \quad (5.3)$$

5.5.3 Restrições

5.5.3.1 Restrição de temperatura e tempo de reação

$$Tmin_i \leq T_{Ri} \leq Tmax_i \quad (5.4)$$

$$tmin_i \leq t_{Ri} \leq tmax_i \quad (5.5)$$

5.5.3.2 Restrição de demanda de óleos

A demanda para cada produto dentro do horizonte de tempo Ht é prevista dentro de limites. O limite superior é definido pela máxima demanda de mercado projetada ($Dmax_{jt}$).

$$QP_{jt} \leq Dmax_{jt} \quad (5.6)$$

O limite inferior sobre a demanda ($Dmin_{jt}$), é ditado pelo departamento de vendas.

5.5.3.3 Restrição de oferta de resíduos

A quantidade máxima de resíduo i processada durante o tempo t , depende da taxa de geração inventariada em função das características sócio-econômicas da área de abrangência onde se encontra a planta de pirólise.

$$QR_{it} \leq Omax_{it} \quad (5.7)$$

5.5.3.4 Restrição de horizonte de tempo

O tempo gasto para processar todos os resíduos durante o período de tempo t não deve ultrapassar o horizonte de tempo conforme mostrado na equação 5.6:

$$\sum_{i=1}^R \sum_{k=1}^{Nb_{it}} (t_i)_k \leq H_t \quad (5.8)$$

a) Tempo de processamento de uma batelada (t_i)

O tempo para processar uma batelada de qualquer resíduo é dado por:

$$t_i = t_{o_i} + t_{R_i} + t_s \quad (5.9)$$

Onde:

t_i = tempo de processamento de uma batelada do resíduo i ;

t_{o_i} = tempo para iniciar a reação com o resíduo i ; (ver item b)

t_{R_i} = tempo de reação do resíduo i ;

t_s = tempo de *set up*. (ver item c)

b) Tempo para iniciar a reação (t_{o_i})

O tempo para iniciar a reação foi calculado através de um balanço de energia, para o reator de pirólise com reação química no estado transiente:

$$t_{o_i} = \frac{m_i c p_i (T_{R_i} - T_{I_i})}{PE - UA(T_{R_i} - T_{\infty}) - PR_i} \quad (5.10)$$

Onde:

t_{o_i} = tempo para iniciar a reação com o resíduo i (s);

m_i = massa de resíduo i (Kg);

$c p_i$ = calor específico do resíduo i (J/Kg°C);

T_{R_i} = temperatura de reação do resíduo i (°C);

T_{I_i} = temperatura inicial do resíduo i (°C);

PE = potência que entra no reator (W);

U = coeficiente global de troca térmica (W/m²°C);

A = área de troca térmica (m²);

T_{∞} = temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$);

PR_i = potência perdida na reação química com o resíduo i (W).

b.1) Potência perdida pelo reator (Pre)

O coeficiente de troca térmica U , foi ajustado segundo a equação abaixo:

$$Pre = U A \Delta T_i \quad (5.11)$$

Onde:

$$\Delta T_i = T_{Ri} - T_{\infty}$$

b.2) Potência Perdida pela Reação (PR_i)

A pirólise é uma reação endotérmica de craqueamento envolvendo uma série de reações complexas. A potência absorvida pela reação com o resíduo i foi determinada através de um balanço de energia considerando o reator carregado com o resíduo i no estado estacionário.

$$PR_i = PPe_i - PRE \quad (5.12)$$

Onde:

PPe_i = potência necessária para manter constante a temperatura de reação do resíduo i ;

c) Tempo de *set up*(ts)

O tempo de *setup* considera carga e descarga do reator, sendo assumido o mesmo entre quaisquer duas bateladas consecutivas.

5.5.4 Modelo de planejamento de produção

A partir das equações (5.1 - 5.12), o modelo para planejamento de produção e *scheduling* que maximiza o lucro pode ser formulado como mostrado abaixo:

$$\text{Maximizar } \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^R QR_{it} PR_{it} + \sum_{j=1}^P QP_{jt} PP_{jt} - GL_t C_t - 0.2 CTP_t \right) \quad (5.13)$$

sujeita a:

$$Tmin_i \leq T_{Ri} \leq Tmax_i \quad i = 1, \dots, R \quad (5.14)$$

$$tmin_i \leq t_{Ri} \leq tmax_i \quad i = 1, \dots, R \quad (5.15)$$

$$QR_{it} \leq Omax_{it} \quad i = 1, \dots, R \quad t = 1, \dots, T \quad (5.16)$$

$$QP_{jt} \leq Dmax_{jt} \quad j = 1, \dots, P \quad t = 1, \dots, T \quad (5.17)$$

$$GL_t = \sum_{i=1}^R (GC_{it} - GP_{it}) \quad i = 1, \dots, R \quad t = 1, \dots, T \quad (5.18)$$

$$CTP_t = 1,25 C_t \sum_{i=1}^R GC_{it} \quad i = 1, \dots, R \quad t = 1, \dots, T \quad (5.19)$$

$$\sum_{i=1}^R \sum_{k=1}^{Nb_{it}} (t_i)_k \leq H_t \quad i = 1, \dots, R \quad t = 1, \dots, T \quad (5.20)$$

$$QR_{it}, QP_{jt}, GP_{it}, GC_{it}, CTP_t, T_{Ri}, t_{Ri}, t_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, R \quad t = 1, \dots, T \quad (5.21)$$

5.6 Otimização

Idealmente, o problema de planejamento de produção deve ser resolvido de forma integrada com o problema de *scheduling* e supervisão, visto que a viabilidade prática de alcançar os objetivos da produção, é determinada pelo sequenciamento e pelos *set points* operacionais. A estratégia de inserir o problema de *scheduling* e supervisão dentro do problema de planejamento foi utilizar um método de otimização baseado em Algoritmos Genéticos.

5.6.1.1 Algoritmos Genéticos

Cada *string* da população é formada por uma sequência das variáveis tipo de resíduo, temperatura e tempo de processamento, sendo o comprimento da *string* determinado pelas restrições de demanda de produtos, oferta de resíduos e tempo. O fluxograma da Figura 5.6 mostra a sequência de formação de uma *string*.

Para cada *string* foi atribuído um valor de *fitness* igual ao da função objetivo, associada ao lucro. Um escalonamento foi utilizado no início da otimização, visando manter o nível de competitividade entre as *strings*. Selecionou-se aleatoriamente duas *strings* da população com probabilidade associada ao valor de seu *fitness*, isto é, quanto maior o lucro, maior a probabilidade de seleção (roleta). Antes da realização do *crossover*, foram testadas todas as restrições do modelo, evitando cálculos inúteis. O *crossover* ocorreu entre os mesmos genes ou variáveis nos diferentes pais, com probabilidade de um par de indivíduos selecionados sofrer *crossover*, dependente da taxa de *crossover*. O operador de mutação foi aplicado através de um sorteio para cada gene, com probabilidade do gene sofrer mutação, dependente da taxa de mutação. Foi também utilizado o operador elitismo, repassando 10% dos melhores indivíduos da população de uma geração para a próxima sem que estes sofressem qualquer tipo de alteração conforme proposto por CLAUMANN (1999). Novo escalonamento foi utilizado no final da otimização, evitando iniciar procedimento enumerativo nesta etapa. O procedimento descrito a partir do operador seleção foi repetido para cada geração, onde a nova população foi gerada do mesmo tamanho da população inicial e com o valor da função objetivo igual ou maior a cada geração. Essa nova população obtida, resultou em uma seqüência representativa do sequenciamento da produção e de dados de temperatura e tempo de batelada para cada um dos resíduos, dentro de um horizonte de tempo pré definido.

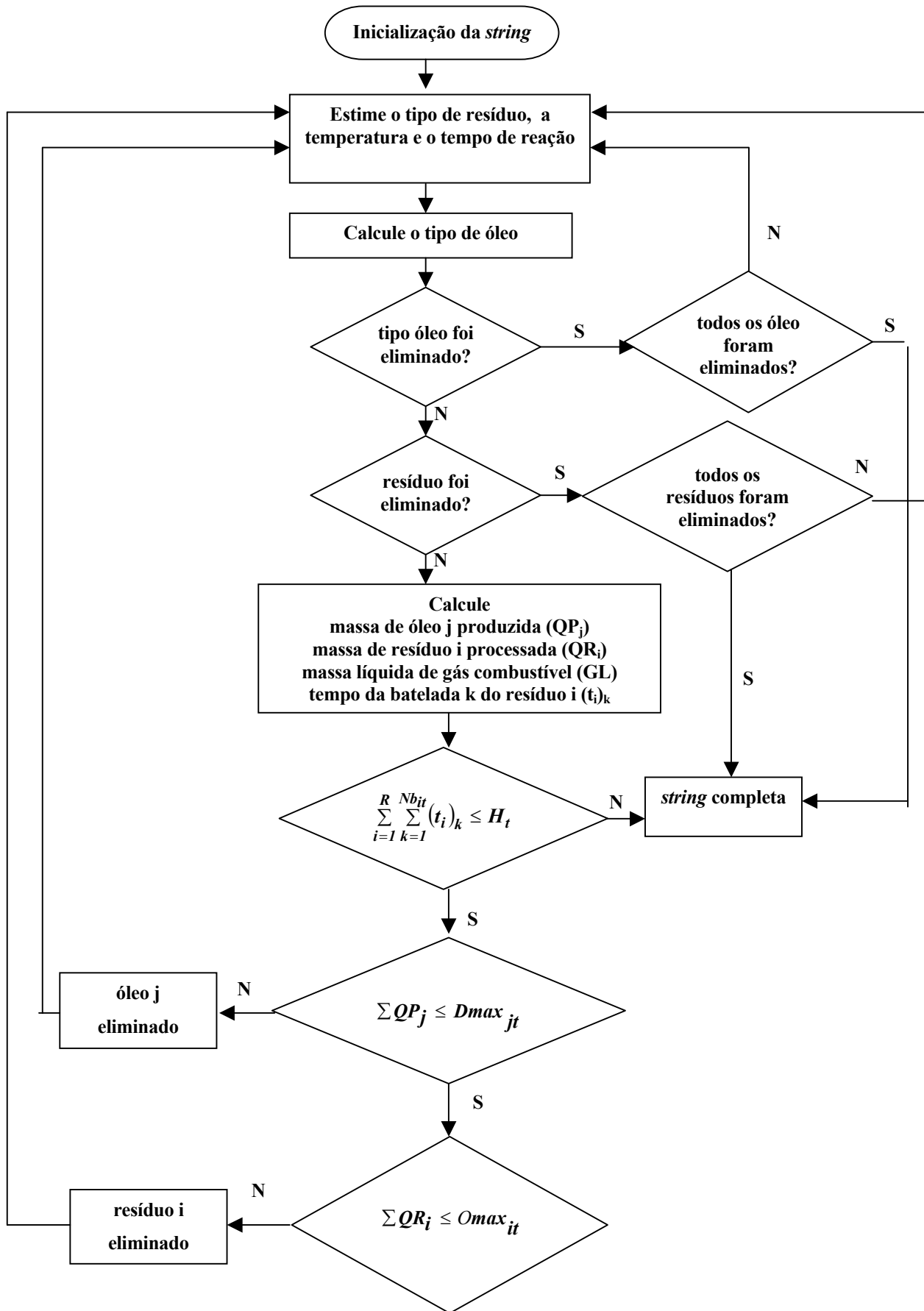


Figura 5-6 Fluxograma demonstrativo da formação de uma string

Esse conjunto de dados, no final do período, determinou o lucro máximo, o número de bateladas e as quantidades de resíduos processadas e de produtos gerados neste período, a partir de cada resíduo. Os parâmetros e os operadores genéticos utilizados na simulação são mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5-2 Operadores e parâmetros genéticos usados na simulação

| | |
|----------------------------|---|
| Probabilidade de mutação | 0.003 |
| Probabilidade de crossover | 0.95 |
| Tipo de crossover | intermediário com interpolação e extrapolação |
| Tipo de mutação | Uniforme |
| Escalonamento | sigma |

5.6.1.2 Rescheduling

O atual mercado apresenta-se competitivo com frequentes mudanças de produtos e variações de preços e de demanda. Para enfrentar essa situação são necessários dinâmicos planejamento e sequenciamento de produção de plantas batelada multiprodutos, com a conseqüente atualização das condições operacionais da planta. O algoritmo proposto torna-se dinâmico, através da ferramenta denominada *rescheduling*. É usado um rescheduling do tipo generativo (BAEL, 1999), o que significa que toda vez que o algoritmo reconstrói um “schedule” ele resequencia todas as variáveis afetadas pela modificação. Esse mecanismo opera segundo as seguintes etapas:

Etapa 1: Inicia-se inserindo a data na qual houve a alteração da(s) variável *input*;

Etapa 2: Procede-se a realização da(s) alteração desejada;

Etapa 3: Calcula-se, até a data definida na Etapa 1, as quantidades remanescentes de resíduos a serem processadas e as de óleos a serem produzidas, estipulando novos limites de oferta de resíduos e de demanda de óleos;

Etapa 4: Calcula-se quantos dias faltam para o término do mês, a partir da data estipulada na Etapa 1, definindo um novo horizonte de tempo;

Etapa 5: Utiliza-se o método de algoritmos genéticos, conforme item 5.7.5.1, para recálculo do novo planejamento e sequenciamento de produção e das novas condições operacionais, a partir da data definida na etapa 1.

5.7 Estudo de Viabilidade Econômica

5.7.1 Receita

A receita foi gerada tanto pelos óleos combustíveis e inflamáveis gerados quanto pelo gás combustível produzido pelas reações de pirólise.

A quantidade de óleos produzida, por batelada, foi determinada através do rendimento da reação utilizando dados experimentais coletados no reator de pirólise de bancada do tipo retorta. O preço do óleo combustível seguiu tabela de preços da PETROBRÁS divulgada em www.petrobras.com.br/mapport1.htm. Esse valor é determinado em função do tipo de óleo que é classificado por normas da ANP que especifica os óleos combustíveis de origem nacional ou importados a serem comercializados em todo o território nacional (PORTARIA Nº80, 1999). Essa portaria foi obtida através de visita à PETROBRAS de São Mateus do Sul, no Paraná, onde são processados óleo e gás combustível através da pirólise de uma mistura de xisto e pneus. Para os inflamáveis, o preço foi determinado como 70% do valor do solvente virgem, conforme rege o mercado local.

Os gases gerados pela reação devem ser parte usados como geradores de energia para alimentar o próprio processo de pirólise, reduzindo custos energéticos e parte vendidos como Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), cujo preço também é determinado por tabela da ANP.

5.7.2 Custos Operacionais

Na análise de viabilidade econômica do processo de pirólise, o custo com gás combustível foi considerado como 80% do custo total operacional, por ser o mais relevante, e os outros 20% representaram outros custos de manufatura, como manutenção, mão-de-obra, distribuição e venda. A matéria prima não foi considerada no custo, uma vez que as empresas desejam se desfazer dos resíduos gerados, representando parte da receita.

5.7.2.1 Análise de Investimentos

Foi utilizado o seguinte modelo para o investimento total do capital (ITC):

$$\text{ITC} = \text{Custos fixos} + \text{Capital de trabalho} + \textit{Start-up} \quad (5.22)$$

Os custos com equipamentos devem ser obtidos diretamente do fabricante e os demais custos diretos, indiretos e de *start-up*(custos para dar partida na planta) foram determinados por correlações de Guthrie (DOUGLAS, 1988).

Existem muitas formas para medir a atratividade de um investimento. Talvez, a mais popular é aquela que compara o retorno do investimento com o capital requerido para o investimento. Essa medida de rentabilidade é a taxa de retorno sobre o investimento, denominada ROI, dada pela expressão abaixo:

$$ROI = \frac{\textit{Lucro do período}}{\textit{Investimento Total do Capital}} \quad (5.23)$$

No Capítulo seguinte, a metodologia apresentada é aplicada ao caso da região da cidade de Caxias do Sul.

Capítulo 6

Aplicação

A metodologia descrita no Capítulo 5 foi aplicada à região da cidade de Caxias do Sul. A caracterização da região de estudo permitiu a escolha de resíduos de plásticos e de tinta, tanto pela taxa de geração quanto pelo grau de periculosidade. Baseado nesses resíduos e nos produtos resultantes da pirólise, foram determinados os equipamentos participantes do sistema de reação e separação, equipamentos de controle e de análise de óleos e de VOCs para os quais foram conferidos demanda e valor econômico no mercado. Esses dados foram usados na simulação da operação de um reator de pirólise industrial para a região de estudo, baseada em um modelo de otimização de planta batelada multiprodutos.

6.1 Área de Abrangência

Os experimentos de pirólise bem como a coleta dos resíduos industriais estudados foram realizados no município de Caxias do Sul, cidade do interior do Estado do Rio Grande do Sul, situada a aproximadamente 120 quilômetros da Capital, Porto Alegre, com aproximadamente 400.000 habitantes. Constitui-se atualmente no segundo pólo econômico do Estado e o terceiro pólo metal-mecânico do País, possuindo uma renda *per capita* de US\$10.000,00 e um PIB de 6.5% em relação ao estadual.

A cidade emprega mais de 100.000 trabalhadores sendo 65% nos setores da indústria. A economia caxiense é composta da seguinte forma: 58,13% em indústrias, 37,91% em comércio e serviços; 3,96% na agricultura, segundo dados da Câmara de Indústria e Comércio de Caxias do Sul (CIC). Esta participação dos setores da economia caxiense é válida a partir de 1998 e a composição da economia industrial da cidade é mostrada na Tabela 6.1.

Tabela 6-1 Composição da economia industrial

| | Setor Participação |
|---|--------------------|
| Indústria da alimentação | 12,00% |
| Indústria da fiação e tecelagem e vestuário | 11,00% |
| Indústria da madeira e do mobiliário | 8,00% |
| Indústria do material plástico | 9,00% |
| Indústria metal. de bens de capital | 40,00% |
| Indústria metal. de bens de consumo | 20,00% |

Os 16 mil estabelecimentos industriais na cidade de Caxias do Sul, aliados aos dados da Tabela 6.1, refletem a grande quantidade de resíduos sólidos industriais gerados, especialmente pelas indústrias metalúrgicas e moveleiras, geradoras de borra de tintas e pelas indústrias geradoras de resíduos plásticos, sendo esses os resíduos sólidos industriais escolhidos para estudo neste trabalho, especificamente acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS), polipropileno (PP) e borra de tinta de origem poliuretânica (NR5).

6.2 Inventário de Resíduos Sólidos Industriais

Com o objetivo de determinar o potencial gerador de resíduos sólidos industriais na cidade de Caxias do Sul, foram inventariados nos anos de 1993, 1996, e em 2002, as principais

indústrias geradoras de resíduos sólidos, os respectivos resíduos e as quantidades geradas. Os principais resíduos Classe I, II e III, gerados na cidade de Caxias do Sul, são mostrados na Tabela 6.2.

Tabela 6-2 Principais resíduos gerados no município de Caxias do Sul

| Classe I | Classe II/III |
|--|---|
| Lodo da ETE | Lodo de lavagem de lã |
| Resíduos e lodos de tintas da pintura industrial | Resíduos têxteis |
| Resíduos de laboratórios | Pneus |
| Lodos de óleos | Panos, plásticos e carpetes |
| Resíduos sólidos com solventes | Borracha |
| Óleos hidráulicos e solventes orgânicos | Fibra de vidro |
| Lodo com Cianeto | Areia de jateamento |
| Sais de têmpera | Areia de filtro manga |
| Embalagens de produtos químicos | Rebolos de corte |
| Restos de solda | Vidros |
| Lixas e resíduos de polimento | Terra infusória carvão ativo |
| Amianto | Descarne de peles e restos de materiais orgânicos |
| Resíduos de metais (Cr, Fé, Ni e Cu) | Lodo de descarne |
| Resina e areia de fundição | Aparas de couro |
| | Pó de massa plástica |
| | Entulhos de construção |

Fonte: Fundação Ambiental Sul, 1994

As Tabelas 6.3 a 6.5 relacionam a produção mensal da cidade em função da classificação dos resíduos e do número de empresas consultadas, assim como o preço de estocagem.

Tabela 6-3 Geração de resíduos sólidos em Caxias do Sul,1992

| Resíduos | Produção mensal (t/mês) | Preço de Estocagem (R\$/ton) |
|-------------|-------------------------|------------------------------|
| Classe I | 639 | 0 |
| Classe II | 1589 | 0 |
| Classe III | 87 | 0 |
| Total | 2315 | |
| Nº empresas | 596 | |

Fonte: Empresa e Ambiente, 1993

Tabela 6-4 Geração de resíduos sólidos em Caxias do Sul,1996

| Resíduos | Produção mensal (t/mês) | Preço de Estocagem (R\$/ton) |
|-------------|-------------------------|------------------------------|
| Classe I | 60,36 | 160 |
| Classe II | 80,0 | 102 |
| Classe III* | - | 102 |
| Total | 140,36 | |
| Nº empresas | 44 | |

Fonte: Fundação Ambiental Sul,1996

* sem registro

Em 2002, a Universidade de Caxias do Sul, inventariou resíduos Classe I, especialmente lodo galvânico e borra de tinta, na proporção de 85% e 15%, respectivamente, como mostrado na Tabela 6.5.

Tabela 6-5 Geração de resíduos sólidos em Caxias do Sul, 2002

| Resíduos | Produção mensal (t/mês) | Preço de Estocagem (R\$/ton) |
|-------------|-------------------------|------------------------------|
| Classe I | 199,843 | 300 – 380 |
| Classe II* | - | 150 |
| Classe III* | - | 150 |
| Total | 199,843 | |
| Nº empresas | 143 | |

Fonte: Relatório do Projeto RGP - UCS, 2002

* sem registro

Embora não tenham sido inventariados resíduos plásticos (Classe III) através de levantamento realizado junto a aterros sanitários, estima-se que cerca de 50 toneladas por mês de resíduos termoplásticos, onde se enquadram os resíduos estudados, PP e ABS estejam nestes estabelecimentos, em proporções desconhecidas. Quanto a composição de termoplásticos, existem dados somente nos depósitos de lixo da cidade, cuja composição média é de 47% de Polietileno, 16% de Polipropileno, 16% de poliestireno, 6,5% de Policloreto de vinila e 14,5% de outros, conforme pesquisa realizada pela empresa de consultoria CSD Geoklock e divulgada pela revista Empresa & Ambiente, 1993.

6.3 Aspectos Legais

A legislação que dispõem sobre o transporte, classificação e destinação final dos resíduos gerados pelo Parque Industrial do País, estado do Rio Grande do Sul e município de Caxias do Sul é a seguinte:

Legislação Federal

- CONSTITUIÇÃO BRASILEIRA, artigo 225 - dispõe sobre a proteção ao meio ambiente

- Resolução CONAMA/Nº 006, de 15 de junho de 1988 – regulamenta os tipos e destino dos resíduos industriais, bem como fornece critérios de enquadramento de indústrias geradoras de resíduos.

- Lei Nº6.938/81 - estabelece a Política Nacional de Meio Ambiente

- Lei 6.803/80 - dispõe sobre as diretrizes básicas para o zoneamento industrial em áreas críticas de poluição.

Legislação Estadual (Rio Grande do Sul)

- Lei Nº 9.921, de 27 de dezembro de 1993 – determina responsabilidades e destinação final dos resíduos sólidos e dá outras providências.

Legislação Municipal (Caxias do Sul)

- Lei Municipal Nº3600, de 13 de dezembro de 1998 - regulamenta o transporte e o armazenamento de produtos perigosos à saúde humana e ao meio ambiente;

- Lei Municipal Nº 3.955, de 418 de dezembro de 1992 – trata dos resíduos industriais, domiciliares e hospitalares do município.

6.4 Equipamentos do Aparato Experimental de Pirólise

Os equipamentos que compõem o aparato experimental de pirólise foram selecionados com dois objetivos principais:

1) determinar a viabilidade técnica de um reator industrial de pirólise, visto que os produtos resultantes possuem diferentes qualidades e conseqüentemente valor de mercado.

Assim, em todas as corridas experimentais foram determinadas as composições dos produtos formados.

2) coletar dados de temperatura, tempo de batelada, energia, massa e composição de produtos. Esses dados são necessários para modelar o reator, visando a obtenção do rendimento de produtos, da energia gerada e consumida em todas as reações.

6.4.1 Equipamentos de Reação e Separação

6.4.1.1 Retorta e Vaso Separador Flash

Um reator experimental denominado retorta foi usado para reação de pirólise operando em batelada. Esse reator serviu para coletar a massa e obter a composição dos produtos formados com o objetivo de modelar tanto a conversão de resíduo quanto a energia gerada pelos gases combustíveis produzidos na reação. As dimensões da retorta são dadas pela Tabela 6.6.

Tabela 6-6 Aspectos dimensionais da retorta

| Características | Dados |
|-----------------------------|----------------|
| Pressão máxima | 30 atm |
| Temperatura máxima | 700°C |
| Material do casco e tampo | Aço inox 316 |
| Material das peças internas | Aço inox 316 |
| Diâmetro interno | 73,33 mm |
| Diâmetro externo | 90,48 mm |
| Espessura real do reator | 8,57 mm |
| Altura | 138,87 mm |
| Volume do reator | 579 mL |
| Disco de ruptura | Tubulação de ¼ |

O vaso separador foi dimensionado para ter um volume máximo de líquido de 20 mL e é constituído por um tubo de aço inoxidável, onde recolhe-se o gás de reação pelo topo e o óleo gerado, pelo fundo do separador. O aparato experimental é mostrado na Figura 6.1.



Figura 6-1 Aparato experimental constituído por retorta, vaso separador e sistema de análise

6.4.1.2 *Reator Pirolítico*

Um reator de aço carbono, com as características construtivas apresentadas na Tabela 6.7 foi montado no Laboratório de Reatores do Departamento de Engenharia Química da Universidade de Caxias do Sul. Através desse sistema, mostrado na Figura 6.2, foi realizada a coleta de dados de energia usados na modelagem da energia consumida pela reação, em função

da temperatura e tempo de reação e também da massa de resíduo alimentada. Sua construção foi necessária uma vez que a retorta não se mostrou sensível à variação de massa de resíduo alimentada.

Tabela 6-7 Características físicas do reator pirolítico

| | |
|---------------------------|-------------|
| Material do tampo e casco | Aço carbono |
| Diâmetro interno | 167 mm |
| Diâmetro externo | 207 mm |
| Espessura | 20 mm |
| Altura externa | 280 mm |
| Volume | 8000 mL |



Figura 6-2 Foto do sistema pirolítico usado para aquisição *on line* de dados de energia

6.4.2 Equipamentos de Controle

6.4.2.1 Sensor de Temperatura

Um termopar tipo J localizado em um poço na tampa do reator é usado como sensor de temperatura. O termopar está ligado ao controlador de temperatura através de um condicionador de sinal e uma placa de aquisição de dados da marca Computer Boards modelo CIO- DAS- Jr 333.

6.4.2.2 Sensor de Pressão

Um manômetro tipo Bourdon acoplado a uma serpentina de aço inox para dispersão do calor é utilizado para registrar a pressão.

6.4.2.3 Módulo de Potência

Transforma o sinal escrito pela placa de aquisição de dados de 0 a 5 volts para tensão de 0 a 220 volts.

6.4.2.4 Resistência Elétrica

Recebe o sinal do módulo de potência e o usa para aquecer a reator até a temperatura desejada.

6.4.2.5 Condicionador de Sinal

Transforma o sinal em milivolts da saída do termopar em volts na faixa de 0 a 5 volts.

6.4.2.6 Placa de Aquisição de Dados tipo CIO-DAS-Jr

Lê o sinal do condicionador de 0 a 5 volts, transforma o sinal de analógico para digital e emite um sinal também de 0 a 5 volts.

6.4.2.7 Software “Eclipse Windows”

Controla a temperatura do reator, através de um programa escrito em linguagem *elipse basic*. Grava os dados de temperatura, tensão de saída da placa de aquisição de dados e o tempo de amostragem, em um arquivo do programa “*excel*”.

6.4.3 Equipamentos de Análise

6.4.3.1 Cromatógrafo e Integrador

Um cromatógrafo com detector de condutividade térmica marca CG, modelo 35, utilizando coluna Porapak Q, é usado para a determinação dos componentes da fase gasosa. Um integrador eletrônico de mesma marca está acoplado ao cromatógrafo. As condições experimentais para análise dos produtos gasosos são mostradas na Tabela 6.8.

Tabela 6-8 Condições operacionais do cromatógrafo para análise dos produtos gasosos

| | |
|----------------------------|------------|
| Gás de arraste | Hélio (He) |
| Vazão | 0,5 mL/s |
| Temperatura vaporizador | Ambiente |
| Temperatura coluna | 69°C |
| Temperatura bloco detector | 125°C |
| Corrente | 220-250 mA |
| Coluna | Porapak Q |

Os produtos líquidos foram coletados, destilados e analisados por cromatografia gasosa em cromatógrafo de ionização de chama, marca GC-HP 6890, modelo MST – 5973 com espectrômetro de massa acoplado. As etapas e condições desta análise foram:

- a) Aquecimento inicial: Temperatura de 40°C por 5 minutos;
- b) Aquecimento intermediário: Temperatura de 40°C – 180°C por 1 minuto;
- c) Aquecimento final: Temperatura de 180°C – 240°C por 5 minutos;
- d) Vazão de gás de arraste: 103 mL/minuto.

6.4.3.2 *Densímetro*

A densidade foi medida através de um picnômetro, calculando-se a relação entre a massa e o volume que esta ocupa, na temperatura de 20°C, como estabelece o Regulamento Técnico ANP nº 003/99.

6.4.3.3 *Calorímetro*

Para a determinação do poder calorífico dos óleos gerados foi utilizado um calorímetro da marca Babelsberg (Figura 6.3), obedecendo ao procedimento do método da bomba calorimétrica (P-MB-454). Adiciona-se 1 mL de água destilada no calorímetro e a seguir, a amostra é inserida em uma cápsula conectada a dois eletrodos por meio de um fio de ignição do tipo Cromel C. Após seu fechamento, a bomba calorimétrica é pressurizada até 30 atm e imersa em um banho a temperatura ambiente, homogeneizada por meio de agitador. Um termômetro mede a temperatura do banho e quando esta é estabilizada, aciona-se a ignição dando início a combustão. Após três leituras de temperatura iguais, em um intervalo de três minutos, retira-se a

bomba do banho e é realizada a despressurização. São calculados o poder calorífico superior e inferior, através das equações 6.1 a 6.3.

$$H_s = \frac{tA - e_1 - e_2}{m} \quad (6.1)$$

$$A = \frac{H_p + e_1 + e_2}{t} \quad (6.2)$$

$$H_i = 2394 + (0.7195)H_s \quad (6.3)$$

Onde:

H_s = poder calorífico superior, [cal/g];

t = variação da temperatura [°C];

A = equivalente em água do calorímetro [cal/°C];

e_1 = correção para a formação do ácido nítrico [cal], obtido pela titulação;

e_2 = correção para o poder calorífico do fio de ignição [cal];

m = massa da amostra [g];

H_i = poder calorífico inferior, [cal/g].

H_p = poder calorífico padrão do ácido benzóico = 6318 [cal/g]



Figura 6-3 Calorímetro Babelsberg

6.4.3.4 Viscosímetro

Para a análise de viscosidade do óleo usa-se um viscosímetro Brookfield DV++, modelo LV (Figura 6.4). Viscosidade é a resistência do fluido ao escoamento. Está diretamente relacionada com a capacidade de suportar carga. A viscosidade absoluta dos óleos foi determinada a uma temperatura de 54,4 °C, como estabelece o Regulamento Técnico ANP nº 003/99. O viscosímetro é programado através de um software específico, onde são selecionados a velocidade de rotação do cilindro interno e o intervalo de tempo entre as medidas, além do número do *spindle*. É então calculada a viscosidade absoluta e a cinemática é determinada pelo quociente da viscosidade absoluta pela densidade.

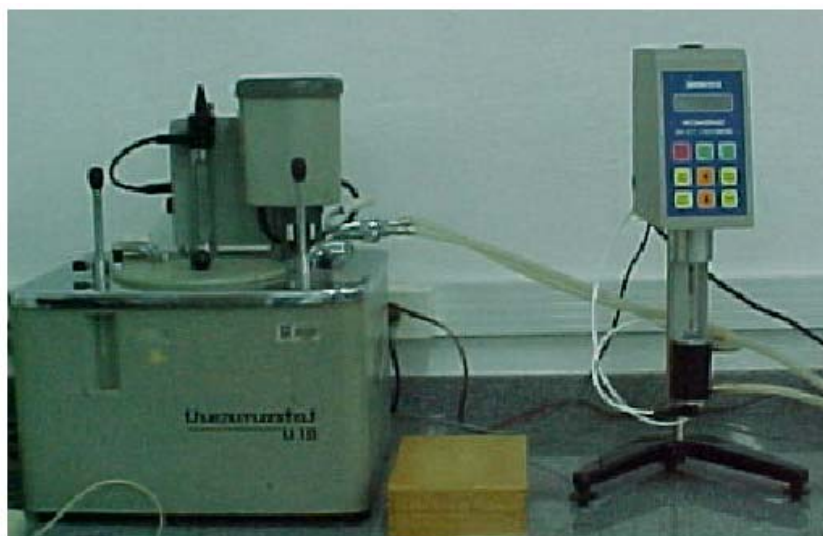


Figura 6-4 Viscosímetro Brookfield DV++, modelo LV

6.4.3.5 Ponto de Fulgor

Ponto de fulgor é uma medida da volatilidade do fluido, temperatura que o óleo pode suportar antes de uma combustão momentânea. A amostra a ser analisada é inserida em uma cuba que é aquecida por resistência elétrica com um agitador regulado a uma velocidade de aproximadamente 130 rpm. O ponto de fulgor foi a temperatura em que a aplicação de uma chama provoca um lampejo no interior da cuba (combustão).

Líquidos combustíveis possuem ponto de fulgor superior a 60° C e igual ou inferior a 93° C. Abaixo de 60°C o óleo é considerado inflamável. A Figura 6.5 mostra equipamento utilizado para a determinação do ponto de fulgor pelo método Pensky-Martens (MB-48).



Figura 6-5 Ponto de fulgor pelo método Pinsky-Martens ASTM D-93 MB-48 modelo PD-530 e 540

6.5 Simulação

6.5.1 Dados de Entrada

Baseado no levantamento de dados estatísticos, técnicos e econômicos para as matérias-primas e produtos, a Figura 6.6 mostra os valores usados como *input* no programa de otimização desenvolvido para a determinação do planejamento e sequenciamento da produção e das condições operacionais do processo de pirólise multiprodutos, visando maximização do lucro. Foram consideradas as taxas de geração de resíduos de borra de tinta, PP e ABS estimadas no último levantamento realizado no ano de 2002, usando os resíduos plásticos na composição de 16% e 5% de PP e ABS, respectivamente.

DADOS DE ENTRADA

mês de referência **dezembro**

resíduos_Sólidos_Industriais

| | ABS | Borra de Tinta | Polipropileno |
|-------------------------|------|----------------|---------------|
| Oferta Mensal (Kg/mês) | 2500 | 30000 | 7500 |
| preço unitário (R\$/Kg) | 0.15 | 0.38 | 0.15 |

Botão: Otimizar

Custo Unitário de Manufatura

Gas Combustível (R\$/Kg) 0.69

Óleo Combustível - Dados do Departamento de Marketing

| | Inflamável | Combustível |
|-------------------------|------------|-------------|
| demanda mínima (Kg) | 1000 | 1000 |
| demanda máxima (Kg) | 30000 | 150000 |
| preço unitário (R\$/Kg) | 0.2 | 0.5 |

Botão: sair

Rescheduling

Os dados de entrada foram atualizados?

sim não

dia do mês OK

Taskbar: Iniciar, Delphi 5, 10:05

Figura 6-6 Dados de entrada usados na simulação

As propriedades e aspectos dimensionais do reator usado na simulação são mostrados na Tabela 6.9.

Tabela 6-9 Propriedades e aspectos dimensionais do reator usado na simulação

| | |
|---------------------------------------|---------|
| diâmetro interno (m) | 0,36 |
| espessura de parede (m) | 0,003 |
| altura (m) | 1,6 |
| massa especifica (Kg/m ³) | 8238 |
| calor específico (J/Kg°C) | 502,416 |
| Temperatura inicial(°C) | 25 |

As propriedades termofísicas dos resíduos em estudo são vistas na Tabela 6.10.

Tabela 6-10 Propriedades termofísicas dos resíduos ABS, borra de tinta e PP

| Propriedades | ABS | Borra de Tinta | PP |
|---------------------------------------|---------|----------------|----------|
| massa específica (Kg/m ³) | 1 | 0,935 | 0,910 |
| calor específico (J/Kg°C) | 1465.38 | 1690,984 | 1590,984 |

6.5.2 Restrições

O problema do planejamento e sequenciamento de produção e da determinação das condições operacionais do sistema é submetido as seguintes restrições: horizonte de tempo, tempo e temperatura, oferta de resíduos e demanda de óleos.

6.5.2.1 Restrição de horizonte de tempo

O tempo total de cada batelada é definido como a soma do tempo para dar início à reação, do tempo da reação na temperatura do *set point* e do tempo de *set up*. Considerando um regime de operação de 8 horas diárias durante 25 dias por mês, isto é, 12000 minutos, a restrição de horizonte de tempo é a seguinte:

$$\sum_{i=1}^R \sum_{k=1}^{Nb_{it}} (t_i)_k \leq 12000$$

Onde:

i = resíduo;

k = número de bateladas;

R = número total de resíduos processados;

Nb_{it} = número total de bateladas do resíduo i durante o tempo t ;

$(t_i)_k$ = tempo de processamento da batelada k do resíduo i .

Além disso, o tempo e a temperatura de reação de cada resíduo i , t_{Ri} e T_{Ri} respectivamente, são restritos dentro de limites pré-estabelecidos em função dos valores do rendimento dos óleos produzidos.

$$5_{min} \leq t_{Ri} \leq 90_{min}$$

$$450^{\circ}C \leq T_{Ri} \leq 650^{\circ}C$$

6.5.2.2 Restrição de Oferta de Resíduos

A quantidade máxima de cada resíduo i processado é restrita em função da taxa de geração dos mesmos (TG_i), conforme inventário descrito no item 6.2 para o ano 2002, no caso da borra de tinta, e estimativa de aterros sanitários para o caso dos resíduos plásticos.

$$TG_{BorraTinta} \cong 30.000$$

$$TG_{ABS} \cong 2.500$$

$$TG_{PP} \cong 7.500$$

6.5.2.3 Demanda de Óleos

A fase líquida produzida nas reações de pirólise é constituída por hidrocarbonetos, classificados como combustíveis ou inflamáveis, segundo seu ponto de fulgor. Os óleos combustíveis podem ser usados para abastecer energeticamente o próprio processo ou serem comercializados como combustíveis em fornos e caldeiras. Os óleos inflamáveis devem ser

vendidos para recuperadoras de solventes, que vendem os solventes recuperados por um valor que é 70% do valor do solvente virgem. As demandas para óleos combustíveis e inflamáveis, $D_{combustível}$ e $D_{inflamável}$ respectivamente, dentro da região de estudo, não são exatamente conhecidas, mas os valores estimados, junto à empresas usuárias de caldeiras a óleo tipo BPF e também junto às recuperadoras de solvente são:

$$D_{combustível} \cong 150 \text{ ton/mês}$$

$$D_{inflamável} \cong 30 \text{ ton/mês}$$

O capítulo 7 apresenta os resultados de caracterização de produtos, classificação de óleos e da simulação aplicados a região de estudo e discutidos neste capítulo.

Capítulo 7

Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados de caracterização de produtos, classificação de óleos e os modelos desenvolvidos para representar o rendimento dos óleos produzidos, a energia consumida e gerada pelas reações de pirólise de resíduos de borra de tinta, ABS e PP. Todos os ajustes apresentados foram realizados através do *software “statistica”*, usando o método de otimização de Quasi-Newton tendo como função objetiva a diferença entre os valores preditos e observados ao quadrado com um critério de convergência menor que 0,0001. Esses modelos foram incorporados a um programa de otimização para maximização do lucro, cujo resultado é mostrado através do planejamento e sequenciamento da produção e das condições de operação aplicados à planta de pirólise descrita no Capítulo 6. Também, é apresentada a performance do método de algoritmos genéticos combinando diversos operadores. Por último é realizada uma análise da viabilidade econômica desta planta.

7.1 Caracterização de Produtos

Os produtos resultantes das reações de pirólise possuem diferentes qualidades e conseqüentemente variados valores de mercado e riscos ambientais. Dessa forma, numa

primeira etapa foi realizada a caracterização dos gases, óleos e sólidos pós-pirólise em diferentes condições operacionais.

7.1.1 Produtos Gasosos

7.1.1.1 Análises Cromatográficas

Os resultados das análises cromatográficas da fase gasosa resultante da pirólise dos resíduos de PP, ABS e borra de tinta são apresentados nas Tabelas 7.2 a 7.4, onde cada uma das seis corridas correspondem às condições de operação dadas na Tabela 7.1.

Tabela 7-1 Condições operacionais das reações de pirólise

| Reação | Temperatura da reação (°C) | Tempo da reação (min) |
|--------|----------------------------|-----------------------|
| 1 | 450 | 10 |
| 2 | 650 | 10 |
| 3 | 450 | 90 |
| 4 | 650 | 90 |
| 5 | 550 | 50 |
| 6 | 550 | 50 |

As Tabelas 7.2 a 7.4 apresentam os resultados em porcentagem em massa, onde cada valor é a média de três repetições. Um cromatograma típico para cada resíduo é mostrado nos anexos A1, A2 e A3.

Tabela 7-2 Análise cromatográfica da fase gasosa produzida por resíduo PP

| Corrida | Ar | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₂ | C ₃ H ₈ | C ₃ H ₆ |
|---------|-------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 49,30 | 4,74 | 7,14 | 2,14 | 7,74 | 26,47 | 2,47 |
| 2 | 6,04 | 51,49 | 12,87 | 1,03 | 0,13 | 9,73 | 6,61 |
| 3 | 12,18 | 9,63 | 16,32 | 2,82 | 1,04 | 39,31 | 8,17 |
| 4 | 7,07 | 56,26 | 10,44 | 1,16 | 0,48 | 13,59 | 5,24 |
| 5 | 4,57 | 30,37 | 20,86 | 2,09 | 0,22 | 15,96 | 11,58 |
| 6 | 3,23 | 32,49 | 23,08 | 2,40 | 0,12 | 19,4 | 13,36 |

Tabela 7-3 Análise cromatográfica da fase gasosa produzida por resíduo de ABS

| Corrida | Ar | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₂ | C ₃ H ₈ | C ₃ H ₆ |
|---------|-------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 57,63 | 5,32 | 5,43 | 3,53 | 2,63 | 21,82 | 3,64 |
| 2 | 17,39 | 60,10 | 14,12 | 4,62 | 0,82 | 1,75 | 1,20 |
| 3 | 29,61 | 11,5 | 6,82 | 3,12 | 5,60 | 40,03 | 3,32 |
| 4 | 26,25 | 57,5 | 10,01 | 6,24 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 29,22 | 37,52 | 16,32 | 4,13 | 1,97 | 5,02 | 5,82 |
| 6 | 38,44 | 32,91 | 13,53 | 3,74 | 2,02 | 4,52 | 4,84 |

Tabela 7-4 Análise cromatográfica da fase gasosa produzida por resíduo de borra de tinta

| Corrida | Ar | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₂ | C ₃ H ₈ | C ₃ H ₆ |
|---------|-------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 31,91 | 4,38 | 1,89 | 10,23 | 49,12 | 1,69 | 0,78 |
| 2 | 15,28 | 43,54 | 5,9 | 2,88 | 27,61 | 3,39 | 1,4 |
| 3 | 32,17 | 6,46 | 2,68 | 7,56 | 47,52 | 2,27 | 1,35 |
| 4 | 15,43 | 42,40 | 3,61 | 2,92 | 33,61 | 1,02 | 1,02 |
| 5 | 19,21 | 23,43 | 10,14 | 6,01 | 33,74 | 3,54 | 3,92 |
| 6 | 21,17 | 23,04 | 8,95 | 5,23 | 35,19 | 3,06 | 3,36 |

A fase gasosa formada pelas reações mostrou-se rica em gases com alto poder calorífico podendo ser vendidos como GLP ou aproveitados para gerar energia para o próprio processo, principalmente para os resíduos de PP e ABS na temperatura de 450°C, devido à elevada concentração de propano e resíduo de borra de tinta à 650°C, com maior concentração de metano.

7.1.2 Produtos Líquidos

7.1.2.1 Análise Cromatográfica

A composição da fase líquida também foi determinada por cromatografia gasosa e, inicialmente, dividida nos seguintes grupos funcionais, devido a grande variedade de produto líquidos: parafinas, olefinas, naftênicos, aromáticos, cetonas, ésteres, alcoois e outros em menores quantidades, como mostram as Tabelas 7.5 e 7.6.

Tabela 7-5 Composição por classe química - Resíduo de borra de tinta

| CLASSE QUÍMICA | Corridas (%massa) | | | | | |
|----------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Parafinas | 2,70 | 2,97 | 1,61 | 0,00 | 4,91 | 0,00 |
| Olefinas | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Naftênicos | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Aromáticos | 63,80 | 65,98 | 67,23 | 71,1 | 63,35 | 73,81 |
| Cetona | 16,61 | 10,6 | 11,62 | 8,43 | 11,99 | 6,41 |
| Éster | 13,11 | 11,34 | 10,84 | 9,16 | 14,53 | 10,99 |
| Álcool | 2,84 | 7,23 | 7,93 | 10,08 | 4,36 | 7,63 |
| Outros | 0,95 | 1,87 | 0,77 | 1,23 | 0,86 | 1,16 |

Tabela 7-6 Composição por classe química - Resíduo de PP

| CLASSE QUÍMICA | Corridas (%massa) | | | | | |
|----------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Parafinas | 4,68 | 5,66 | 5,8 | 5,59 | 3,35 | 5,01 |
| Olefinas | 4,82 | 4,19 | 17,59 | 8,52 | 3,48 | 11,13 |
| Naftênicos | 43,8 | 33,43 | 1,04 | 13,55 | 32,11 | 36,48 |
| Aromáticos | 15,81 | 42,41 | 47,85 | 54,49 | 40,94 | 33,75 |
| Cetona | 1,42 | 0,00 | 1,78 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Éster | 5,34 | 0,00 | 2,99 | 0,00 | 0,49 | 0,00 |
| Álcool | 5,64 | 0,00 | 2,29 | 0,00 | 1,11 | 0,55 |
| Outros | 18,49 | 14,3 | 19,62 | 17,85 | 18,56 | 13,08 |

O resíduo de ABS resultou em praticamente 100% de aromáticos em todos os experimentos.

Devido a grande diversidade de substâncias presentes na fase líquida, é comum identificá-los pelo número de carbonos. Os resultados obtidos por análise cromatográfica para os três tipos de resíduos estudados são mostrados nas Tabelas 7.7, 7.8 e 7.9.

Os produtos líquidos obtidos em todos os experimentos apresentaram aspecto de um óleo viscoso e escuro. Outras análises são importantes para a classificação e comparação desses óleos com outros vendidos no mercado. Além disso, as análises cromatográficas mostraram uma fase rica em solventes, merecendo um estudo quanto a sua possibilidade de uso como solvente em indústrias químicas.

Tabela 7-7 Identificação por número de carbonos da fase líquida obtida de resíduo de borra de tinta

| Nº de carbonos | Compostos |
|----------------|--|
| 2 | Etanona |
| 3 | 2-(1-metiletoxi)-etanol |
| 3 | Propanona |
| 4 | 2-metilpropilester |
| 4 | 2-etoxietanol |
| 6 | 4- metil-2-pentanone |
| 6 | Acetato de butila |
| 6 | 2-butoxietanol |
| 7 | Metilbenzeno; tolueno |
| 8 | Etilbenzeno |
| 8 | 1,4-dimetilbenzeno; xileno |
| 8 | 1,3-dimetilbenzeno |
| 8 | 1,3- dimetilbenzeno |
| 8 | Etenilbenzeno; estireno |
| 8 | 1-fenil-etanone |
| 9 | Isopropilbenzeno |
| 9 | Propilbenzeno |
| 9 | 1,2,4-trimetilbenzeno |
| 9 | 1,2,4- trimetilbenzeno |
| 9 | (1-metiletenil)-benzeno; α -metilestireno |
| 10 | Naftaleno |

Tabela 7-8 Identificação por número de carbonos da fase líquida obtida de resíduo de PP

| Nº de carbonos | Compostos |
|----------------|--|
| 2 | Etanol |
| 4 | 2-metil-propanonitrila |
| 5 | 2-pentanona |
| 6 | Ciclohexano |
| 6 | Benzonitrila |
| 7 | 4-heptanona |
| 7 | Metilbenzeno; tolueno |
| 8 | Etilbenzeno |
| 8 | 1,3-dimetilbenzeno |
| 8 | Etenilbenzeno; estireno |
| 8 | 2etil-1-hexanol |
| 8 | Benzenoacetona |
| 9 | 1-etil-3-metilbenzeno |
| 9 | Propilbenzeno |
| 9 | 1-propenilbenzeno |
| 9 | Isopropilbenzeno |
| 9 | (1-metiletenil)-benzeno; α -metilestireno |
| 10 | Butilbenzeno |
| 10 | 3-butenil-benzeno |
| 10 | Benzenobutanonitrila |
| 10 | Naftaleno |
| 11 | Undecano |
| 11 | Undeceno |
| 11 | 1-metil-naftaleno |
| 12 | 1-dodeceno |

continua Tabela 7-8 Identificação por número de carbonos da fase líquida obtida de resíduo de PP

| | |
|----|---------------|
| 12 | Dodecano |
| 13 | Tridecano |
| 13 | 1-trideceno |
| 13 | 1,1-bifenil |
| 14 | Fenantreno |
| 14 | 1-tetradeceno |
| 14 | Tetradecano |
| 15 | Pentadecano |
| 16 | hexadecano |
| 16 | 1-hexadeceno |
| 17 | Heptadecano |
| 18 | Octadecano |
| 18 | 1-octadeceno |

Tabela 7-9- Identificação por número de carbonos da fase líquida obtida de resíduo de ABS

| Nº de carbonos | Compostos |
|----------------|--|
| 7 | Metilbenzeno; tolueno |
| 8 | Etilbenzeno |
| 8 | 1,4-dimetilbenzeno; xileno |
| 8 | 1,3-dimetilbenzeno |
| 8 | Etenilbenzeno; estireno |
| 9 | Isopropilbenzeno |
| 9 | 1,3,5-trimetilbenzeno |
| 9 | (1-metiletenil)-benzeno; α -metilestireno |
| 10 | Benzenobutanonitrila |
| 10 | Naftaleno |
| 14 | Fenantreno |

7.1.2.2 Propriedades Físicas

A agregação de valor a esse óleo depende de sua especificação segundo a ANP, através da Portaria N° 80 de 30 de abril de 1999 que inclui os ensaios de calor de combustão, viscosidade cinemática, ponto de fulgor e densidade. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Reatores e Laboratório de Polímeros do Departamento de Engenharia Química, e no Instituto de Biotecnologia da Universidade de Caxias do Sul e são apresentados na Tabela 7.10.

Tabela 7-10 Propriedades físicas dos óleos produzidos por pirólise

| Amostra de óleo | Poder calor. inf. [cal/g] | Viscosidade [cSt] | Massa específica [g/cm ³] | Pto de fulgor [°C] |
|--------------------------|------------------------------|-------------------|--|-----------------------|
| Borra Tinta ¹ | 9222,20 | 64,18 | 0,888 | 25 |
| Borra Tinta ² | 9296,44 | 28,61 | 0,877 | 23 |
| Borra Tinta ³ | 9725,14 | 30,31 | 0,916 | 20 |
| ABS ¹ | 11087 | 56,83 | 0,760 | 65 |
| ABS ² | 10456,10 | 43,32 | 0,767 | 75 |
| ABS ³ | 11363,72 | 54,72 | 0,771 | 76 |
| PP ¹ | 10458,97 | 71,73 | 0,775 | 65 |
| PP ² | 11149,43 | 44,79 | 0,933 | 67 |
| PP ³ | 10883,85 | 45,83 | 0,794 | 67 |

¹ 450°C, 90 minutos

² 550°C, 90 minutos

³ 650°C, 90 minutos

7.1.3 A Fase Sólida

Quanto à fase sólida, para os resíduos plásticos, os mesmos componentes foram encontrados antes e após a pirólise, como mostrado por análise com infravermelho. Entretanto, houve uma redução médian em massa de 98 e 99,5% para os resíduos PP e ABS, respectivamente. Quanto ao resíduo de tinta, a redução foi de 96%p. Este resíduo foi analisado também por espectrometria de fluorescência de raios X, em espectrômetro de fluorescência de raios X – RIX3100, marca Rigaku, após a pirólise e os resultados são mostrados na Tabela 7.11, classificando o mesmo como Classe I, resíduo perigoso, não podendo ser descartado.

Tabela 7-11 Análise de "borra de tinta" após pirólise por espectrometria de fluorescência de raio X

| | |
|-------------------------------|--|
| Elementos em maior quantidade | Chumbo e cromo |
| Elementos em menor quantidade | Titânio, ferro, molibdênio, silício e manganês |
| Elementos em quantidade traço | Cloro, zinco, antimônio e cálcio |

Observação: Elementos com número atômico inferior a doze ($Z < 12$) não foram pesquisados

7.2 Modelagem

7.2.1 Rendimento de óleos

O rendimento dos óleos produzidos pela reação de pirólise foi definido como sendo a razão entre a massa de óleo gerada e a massa de resíduo sólido alimentada. A quantidade de óleo foi medida por meio de equipamento de bancada, mostrado no item 5.3, e os resultados são apresentados a seguir, onde x_i representa o rendimento de óleo à partir do resíduo i , T_{Ri} é a temperatura de reação do resíduo i , R é o coeficiente de correlação e σ indica a percentagem de variância explicada pelo modelo proposto.

O rendimento de óleo, a partir de ABS, em função da temperatura e tempo de batelada é visto no gráfico da Figura 7.1., que mostra a fraca influência do tempo da reação sobre o rendimento de óleo, dentro da faixa de temperatura estudada de 450 a 650°C, e um perfil parabólico para o rendimento em relação à temperatura, passando por um máximo.

O modelo de ajuste proposto é:

$$x_{(ABS)} = -0,001123T_{R(ABS)}^2 + 1,331285T_{R(ABS)} - 305,367 \quad (7.1)$$

$$R = 0,99 \text{ e } \sigma = 98,6\%$$

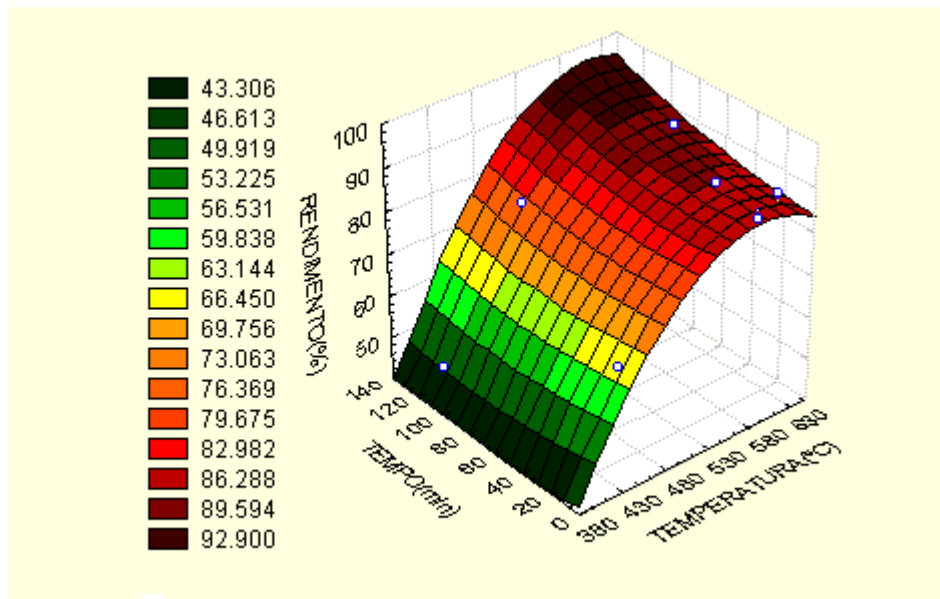


Figura 7-1 Influência da temperatura e tempo de batelada sobre o rendimento de óleo obtido a partir de resíduo ABS

O rendimento de óleo a partir de resíduo PP em função da temperatura da reação e do tempo de batelada, apresenta comportamento semelhante àquele obtido do resíduo de ABS. A Figura 7.2 apresenta este perfil. O modelo proposto é mostrado na equação 7.2.

$$x_{PP} = -0,002309 T_R^2 (PP) + 2,601834 T_{R(PP)} - 648,9 \quad (7.2)$$

$$R = 0,99 \text{ e } \sigma = 98,7\%$$

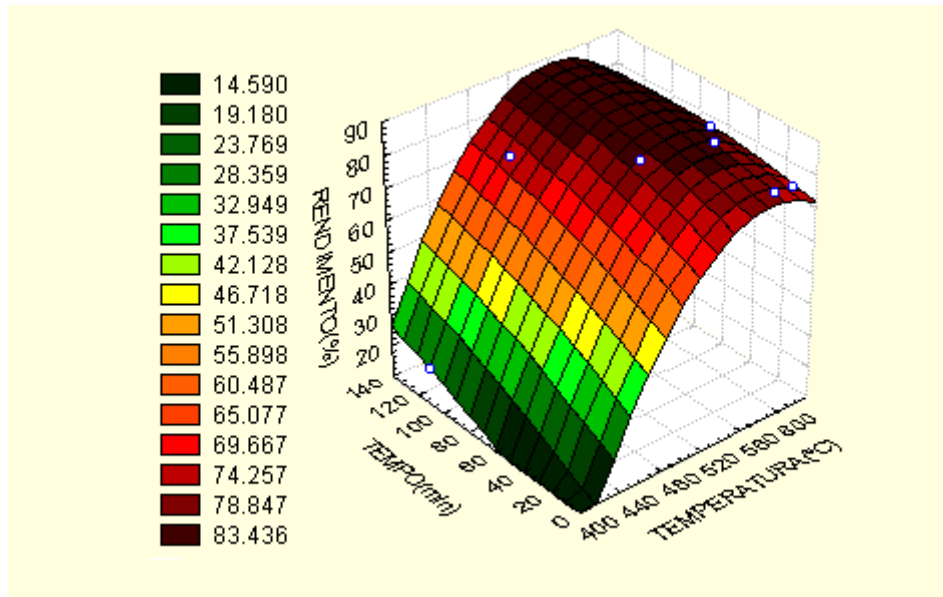


Figura 7-2 Influência da temperatura e tempo de batelada sobre o rendimento de óleo obtido a partir de resíduo PP

O óleo obtido a partir de borra de tinta apresenta o comportamento mostrado na Figura 7.3, mostrando a forte influência tanto da temperatura (T_R) quanto do tempo de batelada (t_R) sobre o rendimento de óleo (x_{BT}). O modelo de ajuste proposto é mostrado pela equação 7.3.

$$x_{BT} = (-4,358E-7T_{R(BT)}^2 + 0,000430T_{R(BT)} - 0,086191)(-0,052159t_{R(BT)}^2 + 10,38872t_{R(BT)} - 889,9664) \quad (7.3)$$

$$R = 0,99 \text{ e } \sigma = 99,8\%$$

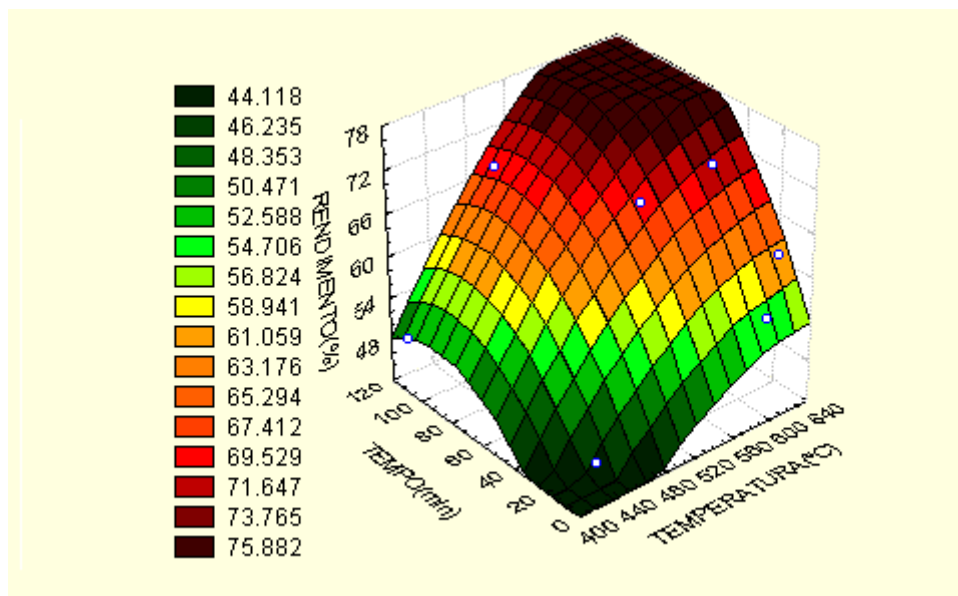


Figura 7-3 Influência da temperatura e tempo de batelada sobre o rendimento de óleo obtido a partir de resíduo de borra de tinta

7.2.2 Energia

O sistema apresentado na Figura 6.1 foi utilizado para coleta de dados *on line* de tempo, temperatura e tensão elétrica a qual é submetida a resistência elétrica de 16,55 ohms que envolve o reator pirolítico. Esse conjunto de dados permitiu a medida da potência elétrica de 5 em 5 segundos e a determinação da energia consumida do início do ensaio até temperatura da reação, usando a regra de Simpson (energia transiente), bem como da potência necessária para manter a temperatura da reação (energia permanente).

7.2.2.1 Energia Transiente (ET_i)

A energia transiente obtida experimentalmente (ET_i) é mostrada nas Tabelas 7.12 a 7.14 para os três resíduos estudados, em função da massa de resíduo alimentada (m_i) e da variação da temperatura da reação (ΔT_7) desde o início do aquecimento até estabilização da temperatura da

reação, considerada estável na faixa do *set point* $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Foram realizadas dez corridas experimentais distintas variando a massa de 0 a 800 gramas e a temperatura de 400 a 650°C . Em cada experimento foram gravados *on line* dados de tempo, temperatura e tensão elétrica emitida para a resistência elétrica externa ao reator durante o estado transiente. Os dados de tensão elétrica foram convertidos para potência conhecendo-se o valor da resistência elétrica e a conversão de potência para energia foi realizada integrando a curva potência *versus* tempo, usando a regra de Simpson.

Tabela 7-12 Energia consumida até estabilização da temperatura de reação com alimentação de ABS

| Ponto | Energia Transiente [ET _{ABS}] (J) | Massa de Resíduo Alimentada [m _{ABS}] (g) | Varição de Temperatura [ΔT_T] ($^{\circ}\text{C}$) |
|-------|--|--|---|
| 1 | 0 | 0 | 0,00 |
| 2 | 6264410 | 500 | 420,86 |
| 3 | 7685670 | 800 | 417 |
| 4 | 9821349 | 0 | 561,80 |
| 5 | 9821302 | 500 | 507,74 |
| 6 | 11419271 | 800 | 507,79 |
| 7 | 11697885 | 500 | 580,62 |
| 8 | 13130876 | 800 | 577,24 |
| 9 | 4896878,15 | 0 | 398,67 |
| 10 | 16436833,88 | 700 | 647,09 |
| 11 | 11480015,71 | 600 | 589,88 |

Tabela 7-13 Energia consumida até estabilização da temperatura de reação com alimentação de borra de tinta

| Ponto | Energia Transiente [E _{TBT}] (J) | Massa de Resíduo Alimentada [m _{BT}] (g) | Varição de Temperatura [ΔT _T] (°C) |
|-------|--|--|--|
| 1 | 0 | 0 | 0,00 |
| 2 | 6797162 | 500 | 421,83 |
| 3 | 9821349 | 0 | 561,79 |
| 4 | 7780044 | 800 | 415,07 |
| 5 | 9553924 | 500 | 512,08 |
| 6 | 10576973 | 800 | 519,32 |
| 7 | 12019577 | 500 | 580,62 |
| 8 | 13253500 | 800 | 585,44 |
| 9 | 4896878 | 0 | 398,66 |
| 10 | 16284978 | 700 | 648,11 |
| 11 | 10283160 | 600 | 538,03 |

Os modelos propostos para a representação da energia transiente são mostrados para os resíduos de ABS, borra de tinta e PP, através das equações 7.4 a 7.6, respectivamente, juntamente com gráficos comparativos entre os valores experimentais e propostos pelo modelo (Figuras 7.4 a 7.6). Nesses gráficos, os pontos 1 a 8 representam aqueles usados para ajuste do modelo. Para validação do modelo foram realizados três experimentos adicionais (pontos 9 a 11), variando a massa de resíduo alimentada com valores dentro da faixa de ajuste e a temperatura usando duas extrapolações representadas pelos pontos 9 e 10. Em todos os casos os dados experimentais concordam satisfatoriamente com aqueles obtidos pelos modelos

propostos, sendo o maior erro encontrado igual a 13% na condições da corrida 11 para o resíduo de ABS. Os modelos foram similares para os três resíduos, com variação somente dos valores dos parâmetros, apresentando coeficiente de correlação de 0,99 e porcentagem de variância explicada de aproximadamente 99%.

Tabela 7-14 Energia consumida até estabilização da temperatura de reação com alimentação de PP

| Ponto | Energia Transiente [ET _{PP}] (J) | Massa de Resíduo Alimentada [m _{PP}] (g) | Varição de Temperatura [ΔT _T] (°C) |
|-------|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 0,00 |
| 2 | 7129031 | 500 | 418,93 |
| 3 | 8430988 | 800 | 407,83 |
| 4 | 9821349 | 0 | 561,79 |
| 5 | 10471822 | 500 | 508,70 |
| 6 | 11796803 | 800 | 505,32 |
| 7 | 11839234 | 500 | 570,48 |
| 8 | 15026908 | 800 | 578,20 |
| 9 | 4896878 | 0 | 398,66 |
| 10 | 16347571 | 700 | 648,25 |
| 11 | 12398247 | 600 | 531,27 |

$$ET_{(ABS)} = (30,1497\Delta T + 7,1506 m_{(ABS)}) \Delta T_T \quad (7.4)$$

$$R = 0,99 \text{ e } \sigma = 98,9\%$$

$$ET_{(BT)} = (30,71804\Delta T + 6,033189 m_{(BT)}) \Delta T_T \quad (7.5)$$

$$R = 0,99 \text{ e } \sigma = 99,3\%$$

$$ET_{(PP)} = (30,0673\Delta T + 10,008 m_{(PP)}) \Delta T_T \quad (7.6)$$

$$R = 0,99 \text{ e } \sigma = 99,3\%$$

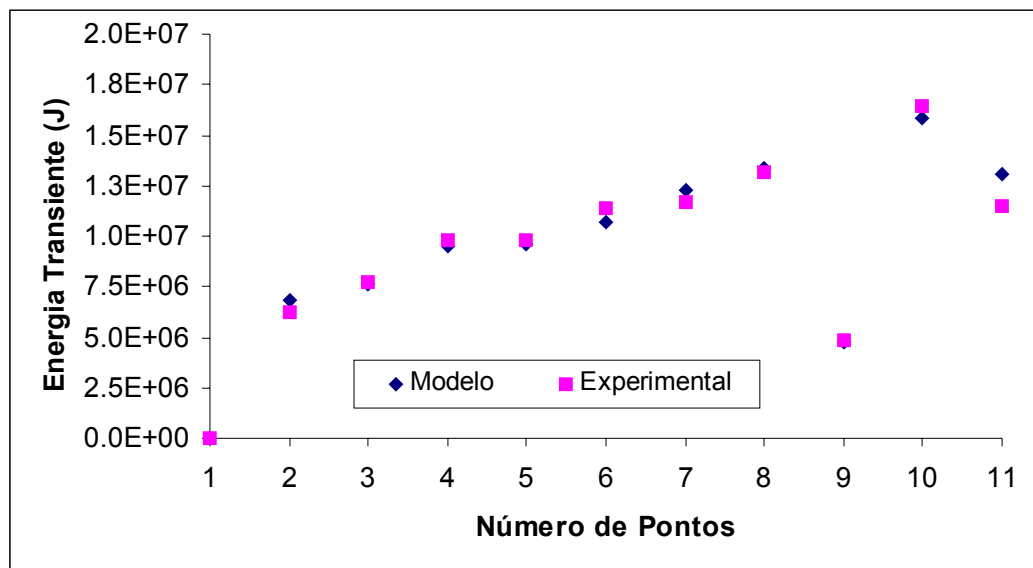


Figura 7-4 Comparação entre valores de energia transiente preditos e experimentais para resíduo de ABS

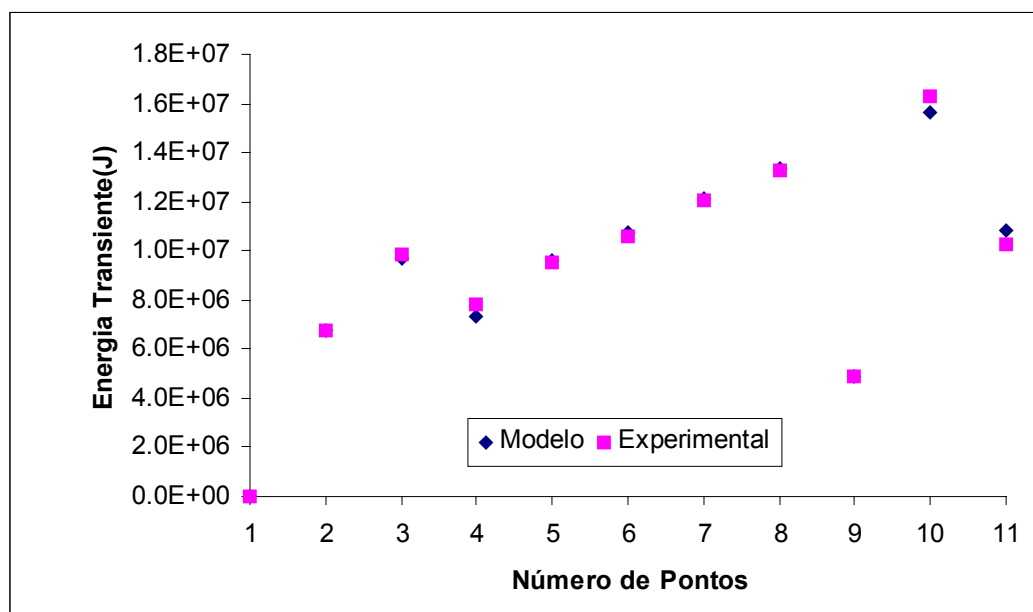


Figura 7-5 Comparação entre valores de energia transiente preditos e experimentais para resíduo de borra de tinta

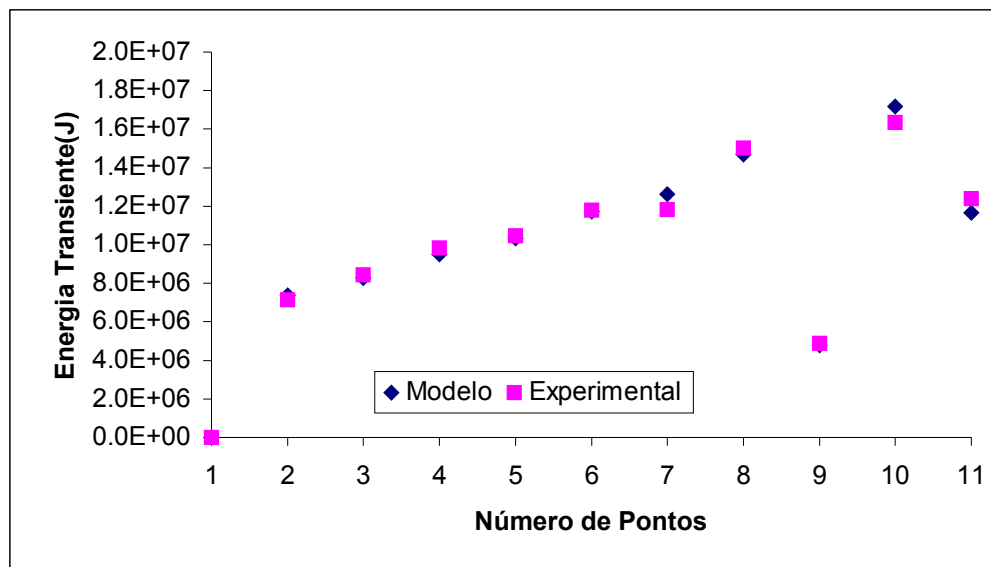


Figura 7-6 Comparação entre valores de energia transiente preditos e experimentais para resíduo de PP

7.2.2.2 Potência Permanente (PP_i)

A potência necessária para manter o sistema pirolítico na temperatura da reação foi determinada em função da massa de resíduo alimentada e da temperatura média da reação, considerada como a média das temperaturas no estado permanente, representado pelo intervalo composto pela temperatura do *set point* $\pm 5^\circ\text{C}$. O aparato experimental mostrado na Figura 6.2 foi utilizado para a coleta *on line* de dados de tempo, temperatura e tensão elétrica emitida para a resistência de aquecimento do reator, no estado permanente, durante 90 minutos. A tensão elétrica foi convertida para potência conhecendo-se o valor da resistência elétrica. As Tabelas 7.15 a 7.17 mostram os valores de potência coletados variando a massa de resíduo de 0 a 800 gramas e a temperatura média de 450 a 650°C. As equações 7.7 a 7.12 mostram os modelos propostos de potência permanente (PP_i) ou energia permanente (EP_i), esta última obtida pela multiplicação da potência pelo tempo de reação (t_{Ri}) em função da massa de resíduo alimentada e da temperatura média da reação. Todos os modelos mostraram-se similares, com variação somente de seus parâmetros, com coeficiente de correlação de 0,99 e aproximadamente 99% da

variância explicada pelo modelo. Os gráficos das Figuras 7.7, 7.8 e 7.9 comparam os valores preditos pelo modelo com os experimentais, mostrando boa concordância. Os experimentos 1 a 8 foram usados para ajuste do modelo e as corridas experimentais 9, 10 e 11 para validação do modelo, usando valores de massa de resíduo alimentada e temperatura média da reação dentro do intervalo dessas variáveis usado no ajuste.

Tabela 7-15 Potência consumida na temperatura de reação com alimentação de ABS

| Ponto | Potência Permanente [PP _{ABS}] (W) | Massa de Resíduo Alimentada [m _{ABS}] (g) | Temperatura Média [TM _{ABS}] (°C) |
|-------|--|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 0,00 |
| 2 | 429,56 | 500 | 453,63 |
| 3 | 489,88 | 800 | 453,57 |
| 4 | 723,68 | 0 | 643,07 |
| 5 | 586,23 | 500 | 552 |
| 6 | 650,96 | 800 | 553,09 |
| 7 | 790,65 | 500 | 643,28 |
| 8 | 804,52 | 800 | 641,56 |
| 9 | 348,25 | 0 | 454,67 |
| 10 | 869,38 | 700 | 647,09 |
| 11 | 606,13 | 600 | 569,53 |

$$PP_{(ABS)} = (0,0017197 TM_{(ABS)} + 0,0002603 m_{(ABS)}) TM_{(ABS)} \quad (7.7)$$

$$EP_{(ABS)} = (0,0017197 TM_{(ABS)} + 0,0002603 m_{(ABS)}) TM_{(ABS)} * t_{R(ABS)} \quad (7.8)$$

$$R=0,99 \text{ e } \sigma = 99,2\%$$

Tabela 7-16 Potência consumida na temperatura de reação com alimentação de borra de tinta

| Ponto | Potência Permanente [PP _{BT}] (W) | Massa de Resíduo Alimentada [m _{BT}] (g) | Temperatura Média [TM _{BT}] (°C) |
|-------|--|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 0,00 |
| 2 | 444,24 | 500 | 455,18 |
| 3 | 506,64 | 800 | 452,82 |
| 4 | 723,68 | 0 | 643,07 |
| 5 | 672,48 | 500 | 551,23 |
| 6 | 662,26 | 800 | 550,67 |
| 7 | 865,56 | 500 | 638,22 |
| 8 | 927,32 | 800 | 638,99 |
| 9 | 362,12 | 0 | 454,67 |
| 10 | 975,40 | 700 | 648,11 |
| 11 | 662,43 | 600 | 568,03 |

$$PP_{(BT)} = (0,0017882 TM_{(BT)} + 0,000368 m_{(BT)}) TM_{(BT)} \quad (7.9)$$

$$EP_{(BT)} = (0,0017882 TM_{(BT)} + 0,000368 m_{(BT)}) TM_{(BT)} * t_{R(BT)} \quad (7.10)$$

R=0,99 e $\sigma = 99,4\%$

Tabela 7-17 Potência consumida na temperatura de reação com alimentação de PP

| Ponto | Potência Permanente [PP _{PP}] (W) | Massa de Resíduo Alimentada [m _{PP}] (g) | Temperatura Média [TM _{PP}] (°C) |
|-------|--|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 0,00 |
| 2 | 490,42 | 500 | 454,67 |
| 3 | 545,40 | 800 | 451 |
| 4 | 723,68 | 0 | 643,07 |
| 5 | 715,68 | 500 | 551,53 |
| 6 | 782,55 | 800 | 543 |
| 7 | 848,05 | 500 | 649 |
| 8 | 1003,25 | 800 | 651 |
| 9 | 1058,93 | 700 | 658,25 |
| 10 | 659,52 | 600 | 561,27 |
| 11 | 346,39 | 0 | 454,67 |

$$PP_{(PP)} = (0,001711 TM_{(PP)} + 0,000563 m_{(PP)}) TM_{(PP)} \quad (7.11)$$

$$EP_{(PP)} = (0,001711 TM_{(PP)} + 0,000563 m_{(PP)}) TM_{(PP)} * t_{R(PP)} \quad (7.12)$$

R=0,99 e $\sigma = 99,0\%$

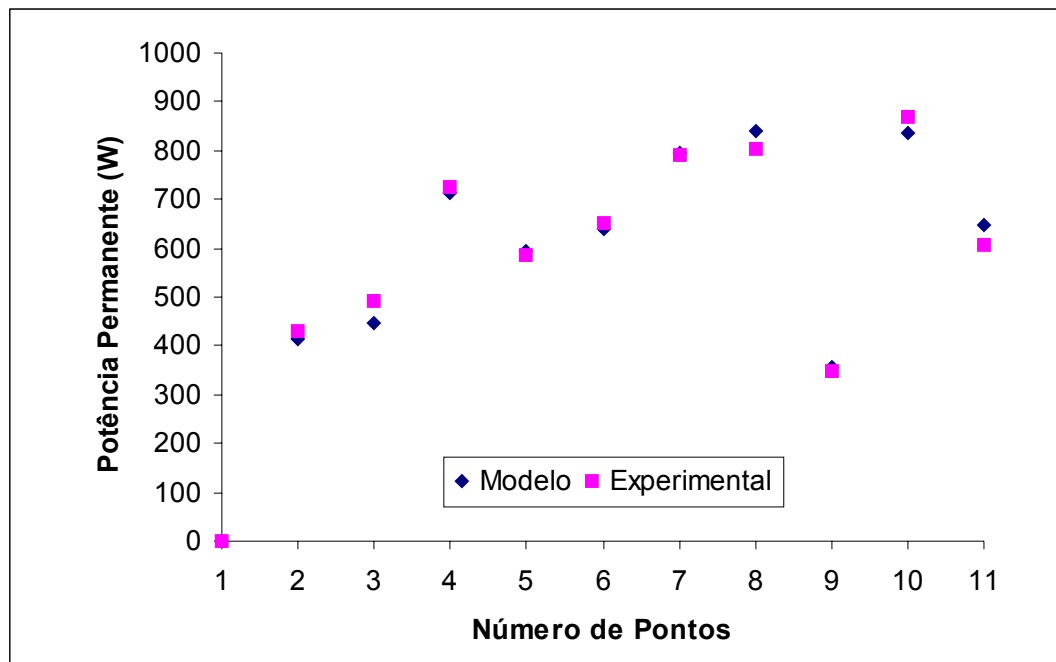


Figura 7-7 Comparação entre valores de potência permanente predita e experimental para resíduo de ABS

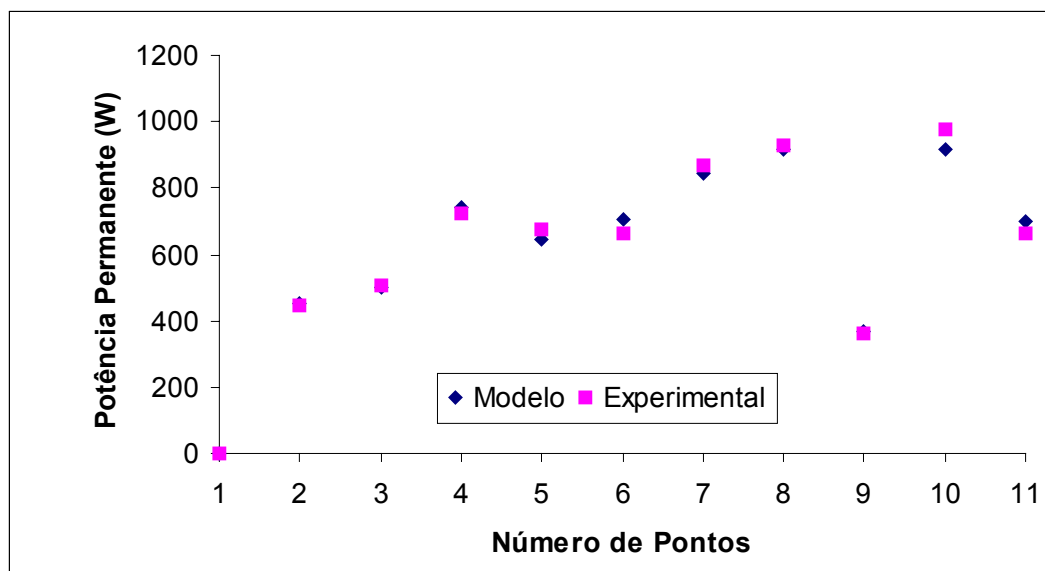


Figura 7-8 Comparação entre valores de potência permanente predita e experimental para resíduo de borra de tinta

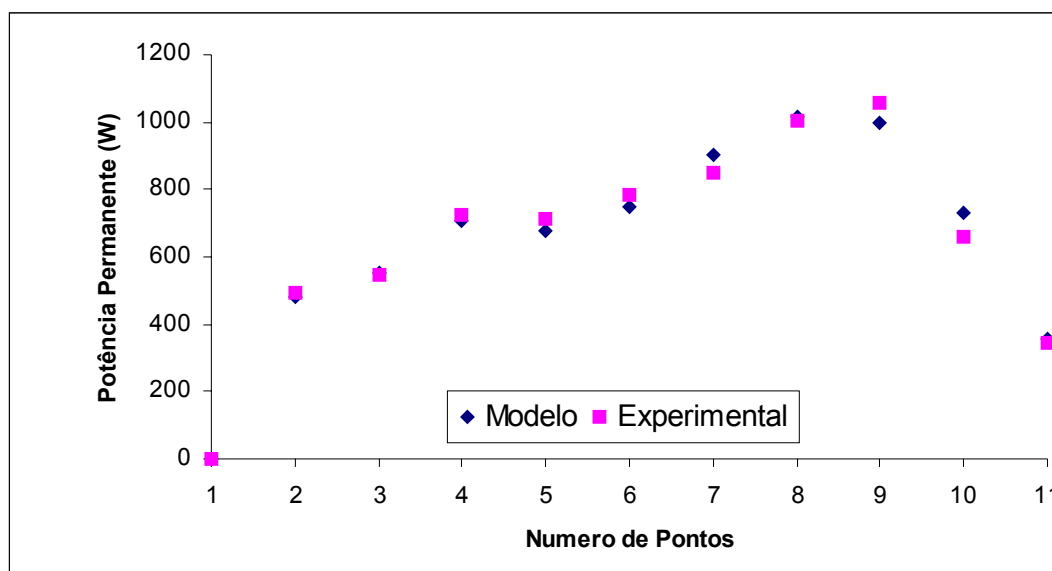


Figura 7-9 Comparação entre valores de potência permanente predita e experimental para resíduo de PP

7.2.2.3 Energia gerada pelos gases da reação (EG_i)

O sistema de retorta descrito no item 6.4.1.1, juntamente com cromatógrafo gasoso foi usado para a coleta e análise dos produtos gasosos da reação. Com a massa e a composição dos gases, determinou-se o calor de combustão da mistura nas condições dadas na Tabela 7.1. O ajuste dos dados experimentais forneceu os modelos mostrados pelas equações 7.13 a 7.15, para os resíduos de ABS, borra de tinta e PP respectivamente, juntamente com tabelas comparativas entre os valores experimentais e aqueles preditos pelo modelo (Tabelas 7.18 a 7.20), onde o tempo de duração do aquecimento é dado por $t_{(i)}$.

Tabela 7-18 Calor de combustão dos gases resultantes da pirólise com resíduo ABS

| Temperatura [T _{R(ABS)}](°C) | Tempo [t _(ABS)](min) | Valores Experimentais [EG _(ABS)] (Kcal/Kg) | Valores Preditos [EG _(ABS)] (Kcal/Kg) |
|---|-------------------------------------|---|---|
| 450 | 89,83 | 1600,02 | 2029,09 |
| 650 | 145,33 | 8000 | 7967,13 |
| 450 | 140,60 | 3450,02 | 3175,88 |
| 650 | 164,70 | 9000 | 9029,01 |
| 550 | 122,83 | 8260 | 8273,34 |
| 550 | 122,83 | 8286,67 | 8273,34 |

$$EG_{(ABS)} = (-0,00287T_{R(ABS)}^2 + 3,312828T_{R(ABS)} - 887,992) * t_{(ABS)} \quad (7.13)$$

$$R = 0,99 \text{ e } \sigma = 99,5\%$$

Tabela 7-19 Calor de combustão dos gases resultantes da pirólise com resíduo de borra de tinta

| Temperatura [T _{R(BT)}](°C) | Tempo [t _(BT)](min) | Valores Experimentais [EG _(BT)] (Kcal/Kg) | Valores Preditos [EG _(BT)] (Kcal/Kg) |
|--|------------------------------------|---|--|
| 450 | 89,83 | 2164,69 | 1685,65 |
| 650 | 145,33 | 6042,15 | 5986,54 |
| 450 | 140,60 | 2332,28 | 2638,34 |
| 650 | 164,70 | 6735,37 | 6784,44 |
| 550 | 122,83 | 5455,58 | 5399,90 |
| 550 | 122,83 | 5344,22 | 5399,90 |

$$EG_{(BT)} = (-0,0014T_{R(BT)}^2 + 1,650333T_{R(BT)} - 440,718) * t_{(BT)} \quad (7.14)$$

$$R = 0,99 \text{ e } \sigma = 98,2\%$$

Tabela 7-20 Calor de combustão dos gases resultantes da pirólise com resíduo de PP

| Temperatura [$T_{R(PP)}$](°C) | Tempo [$t_{(PP)}$](min) | Valores Experimentais [$EG_{(PP)}$] (Kcal/Kg) | Valores Preditos [$EG_{(PP)}$] (Kcal/Kg) |
|------------------------------------|------------------------------|--|--|
| 450 | 90,67 | 4400 | 4231,65 |
| 650 | 145,42 | 10989,80 | 10455,82 |
| 450 | 141,58 | 6500 | 6607,81 |
| 650 | 172,08 | 11921,96 | 12373,19 |
| 550 | 124 | 11057,63 | 10963,95 |
| 550 | 127,75 | 11204,60 | 11295,53 |

$$EG_{(PP)} = (-0,00291T_{R(PP)}^2 + 3,330714T_{R(PP)} - 862,221) * t_{(PP)} \quad (7.15)$$

$$R = 0,99 \text{ e } \sigma = 98,9\%$$

7.2.2.4 Potência perdida pelo reator (Pre)

A potência perdida pelo reator foi determinada como:

$$Pre = U A \Delta T \quad (7.16)$$

Onde:

Pre = potência perdida pelo reator (W);

U = coeficiente global de troca térmica (W/m² °C);

A = área de troca térmica (m²);

ΔT = (temperatura da reação – temperatura ambiente).

O coeficiente global de troca térmica foi ajustado, considerando PR_e igual à potência consumida pela resistência elétrica que envolve o reator, obtida através de ensaios em regime permanente na ausência de reação química, isto é, com um reator vazio, de capacidade 8L e área de troca térmica de 0.18m^2 , variando a diferença de temperatura. O gráfico da Figura 7.10 mostra o ajuste realizado considerando modelo da equação 7.16.

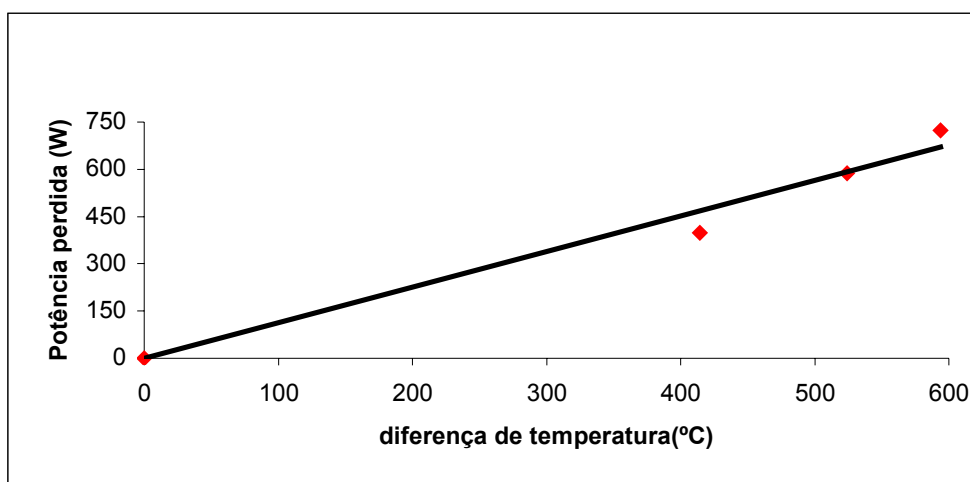


Figura 7-10 Ajuste para determinação do coeficiente global de troca térmica

$$R = 0,99 \text{ e } \sigma = 97,1\%$$

$$U = 6,279 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

7.3 Simulação

Os dados mostrados no item 6.5.1 foram usados para simular o planejamento e sequenciamento de produção bem como as condições operacionais da pirólise de resíduos sólidos industriais aplicados à cidade de Caxias do Sul, usando como método de otimização os Algoritmos Genéticos em codificação real. Foram utilizados como operadores convencionais a seleção por roleta, *crossover* intermediário com extrapolação e mutação uniforme, além dos

operadores de elitismo e escalonamento tipo sigma. Também foram comparados dois tipos de operações de *crossover*: intermediário com interpolação e extrapolação juntamente com procedimento de controle de extrapolação e a influência do escalonamento sobre a performance do método.

7.3.1 Função Objetiva

Inicialmente foi avaliada a influência do tamanho da população sobre o valor da função objetivo de maximização do lucro, utilizando o *crossover* intermediário com extrapolação e mutação uniforme nas taxas de 0,95 e 0,003, respectivamente com escalonamento tipo sigma. Os resultados obtidos para tamanhos de população de 50, 100, 150 e 200 indivíduos são mostrados na Figura 7.11., cujos valores de convergência foram 18500, 19200, 19700 e 19000, respectivamente, para 10000 gerações, com uma diferença de 6,5% entre o melhor e o pior valor da função objetivo. Com 50 indivíduos, o número de gerações usadas não se mostrou suficiente para gerar um bom indivíduo. Entretanto, o aumento da população para 200 indivíduos provocou um maior espalhamento da população, gerando uma maior dificuldade de convergência para o mesmo número de gerações. As duas principais possibilidades de causa são o alto grau de elitismo, que poderia direcionar a busca para um ótimo local ou o azar de se partir de uma população inicial ruim, devido a natureza estocástica do método. Uma população entre 100 e 150 indivíduos apresentou resultados semelhantes, não mostrando melhora significativa acima de 2000 gerações.

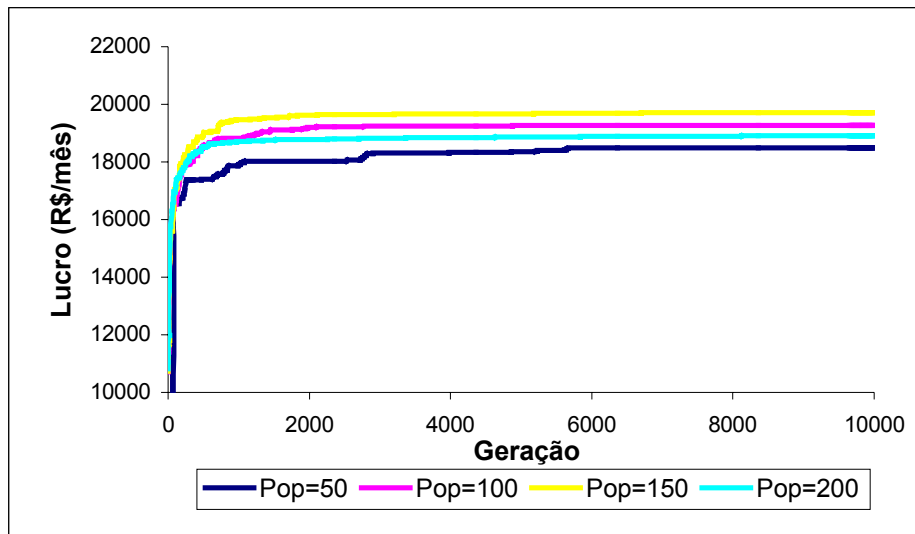


Figura 7-11 Influência do tamanho da população sobre a função objetivo

Foram comparados dois tipos de *crossover*: intermediário interpolador e extrapolador com controle de extrapolação. O resultado é mostrado na Figura 7.12. O uso da extrapolação com controle, para garantir resultados viáveis, melhorou significativamente a performance do método, sendo recomendado esse procedimento, mesmo com outros tipos de *crossover* em codificação real, como os *crossover* lateral, discreto e difuso.

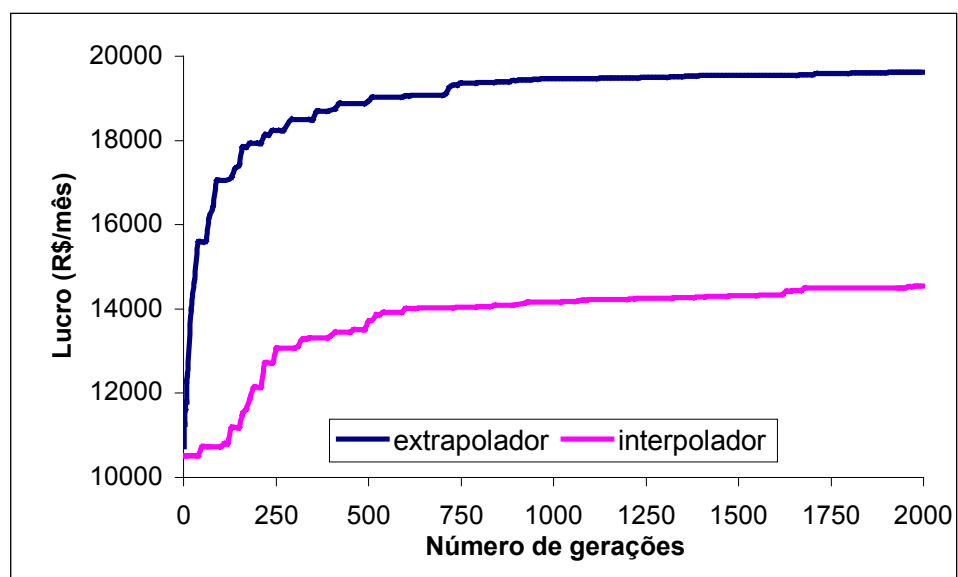


Figura 7-12 Comparação da função objetivo com *crossover* interpolador e extrapolador

O efeito da presença do escalonamento sobre a função objetivo foi analisado, comparando a ausência de escalonamento com o tipo sigma. O resultado é mostrado na Figura 7.13. O uso do escalonamento apresentou melhores resultados, especialmente no final da otimização, quando os indivíduos possuem os *fitness* semelhantes. Os escalonamentos tipo linear e bilinear também foram testados, mostrando comportamento muito semelhante ao tipo sigma.

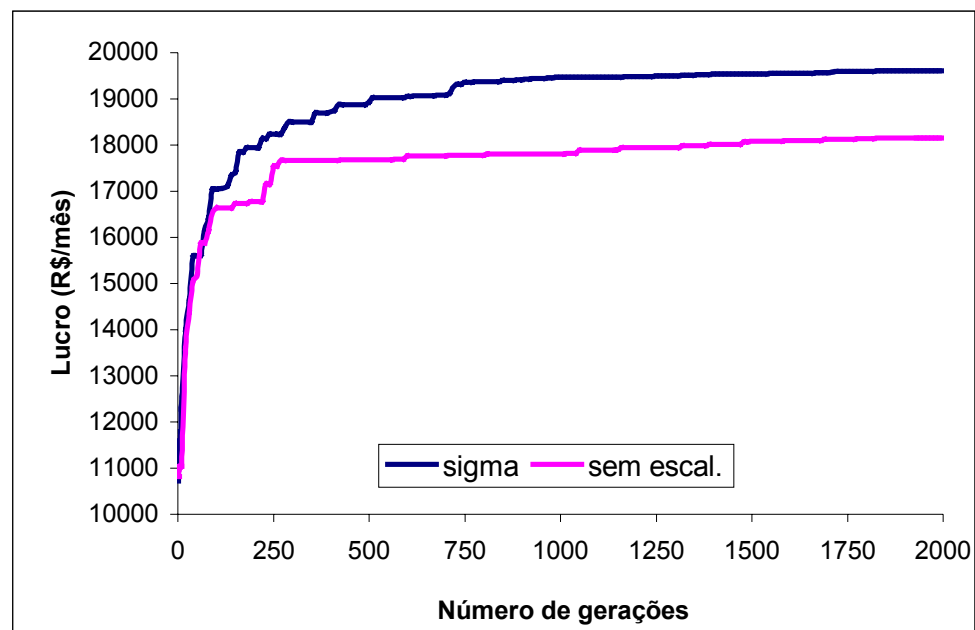


Figura 7-13 O efeito do escalonamento sobre a função objetivo

7.3.2 Planejamento de Produção

O resultado do planejamento de produção obtido é mostrado na Tabela 7.21 para população de 100 indivíduos e 2000 gerações, usando Algoritmos Genéticos como método de otimização. As variáveis determinadas diariamente pelo planejamento de produção são: o tipo

de resíduo a ser processado: ABS, borra de tinta ou PP, a quantidade de resíduo a ser processado e a quantidade de óleo produzida, sendo os valores mostrados na Tabela 7.21 referentes ao óleo inflamável obtido de borra de tinta e óleo combustível obtido de ABS e PP.

A Tabela 7.22 faz um resumo do planejamento de produção apresentado na Tabela 7.21 para o período de um mês, incluindo algumas variáveis econômicas como receita com processamento de resíduos e venda de óleos, custo ou receita com gás combustível. A receita refere-se à venda de gás combustível, se a geração superar o consumo de gás combustível para alimentar o processo, e o custo diz respeito ao gasto com a compra de gás combustível para alimentar o processo, caso a geração não seja suficiente. Além disso, a Tabela 7.22 mostra o lucro máximo obtido e o tempo de execução do programa.

Tabela 7-21 Planejamento de produção para população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| Dia do mês | Tipo de resíduo | Nº de bateladas | Quantidade de óleo produzida (Kg) | Quantidade de resíduo processado (Kg) |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | ABS | 7 | 52,7 | 1139 |
| 1 | BORRA | 2 | 994,6 | 304,4 |
| 2 | ABS | 7 | 87,58 | 1139 |
| 2 | BORRA | 3 | 985,8 | 456,6 |
| 3 | ABS | 1 | 137,1* | 162,8 |
| 3 | BORRA | 5 | 337 | 761 |
| 3 | PP | 2 | | 296,3 |
| 4 | BORRA | 6 | 163,7 | 913,2 |
| 4 | PP | 4 | 325,3 | 592,5 |
| 5 | BORRA | 7 | 210,4 | 1065 |
| 5 | PP | 3 | 241,5 | 444,4 |
| 6 | BORRA | 6 | 191,8 | 913,2 |

continua Tabela 7-21 Planejamento de produção para população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | |
|----|-------|----|-------|-------|
| 6 | PP | 4 | 322 | 592,5 |
| 7 | BORRA | 6 | 173 | 913,2 |
| 7 | PP | 4 | 359,1 | 592,5 |
| 8 | BORRA | 4 | 107,2 | 608,8 |
| 8 | PP | 6 | 485,6 | 888,8 |
| 9 | BORRA | 6 | 189,5 | 913,2 |
| 9 | PP | 3 | 349,5 | 444,4 |
| 10 | BORRA | 8 | 249,5 | 1218 |
| 10 | PP | 2 | 205,2 | 296,3 |
| 11 | BORRA | 5 | 151,2 | 761 |
| 11 | PP | 4 | 462,9 | 592,5 |
| 12 | BORRA | 7 | 206,1 | 1065 |
| 12 | PP | 2 | 237,9 | 296,3 |
| 13 | BORRA | 11 | 318,8 | 1674 |
| 14 | BORRA | 10 | 283,4 | 1522 |
| 14 | PP | 1 | 117,6 | 148,1 |
| 15 | BORRA | 9 | 214,7 | 1370 |
| 15 | PP | 1 | 123,4 | 148,1 |
| 16 | BORRA | 10 | 268 | 1522 |
| 17 | BORRA | 10 | 267,9 | 1522 |
| 18 | BORRA | 10 | 233,6 | 1522 |
| 19 | BORRA | 11 | 316,8 | 1674 |
| 20 | BORRA | 10 | 251,4 | 1522 |
| 21 | BORRA | 11 | 313,6 | 1674 |

continua Tabela 7-21 Planejamento de produção para população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | |
|----|-------|----|-------|-------|
| 22 | BORRA | 9 | 259,2 | 1370 |
| 22 | PP | 2 | 224,8 | 296,3 |
| 23 | BORRA | 10 | 299,5 | 1522 |
| 24 | BORRA | 11 | 311,5 | 1674 |
| 25 | BORRA | 10 | 238,4 | 1522 |

* quantidade total de óleo combustível obtido a partir de ABS e PP.

Tabela 7-22 Resumo do planejamento de produção para pop=100 indivíduos

| Nº de bateladas/mês | ABS | Borra de tinta | PP |
|--|-------------------|----------------|--------------------|
| | 15 | 198 | 38 |
| Quantidade de resíduo processado (Kg/mês) | 2442 | 2,998E4 | 5629 |
| Receita com resíduos (R\$/mês) | 366,3 | 11393,4 | 844,35 |
| Quantidade Óleo Vendido (Kg/mês) | Inflamável | | Combustível |
| | 5497 | | 5772 |
| Receita com venda de óleo (R\$/mês) | 1099,4 | | 2886 |
| Receita com gás combustível (R\$/mês) | 5812 | | |
| Lucro máximo (R\$/mês) | 19200 | | |
| Tempo de execução (h:min:s) | 00:35:16 | | |

7.3.3 Sequenciamento de Produção

O sequenciamento de produção, além da ordem de processamento de cada resíduo, resultou também na temperatura e no tempo para iniciar e conduzir cada batelada. Os resultados obtidos para uma população de 100 indivíduos em 2000 gerações são mostrados no anexo A 4.

7.3.4 *Rescheduling*

Alterações de demanda e preço de óleos, de gás combustível e de resíduos podem ocorrer durante o mês em função das necessidades de mercado e da disponibilidade desses materiais. Assim, é necessário um programa de planejamento e sequenciamento de produção, com flexibilidade suficiente para absorver tais modificações. O método desenvolvido realiza nova otimização partindo do dia em que a modificação ocorreu. A partir daí, são calculadas a quantidade restante de resíduos até o final do mês, um novo limite máximo para a produção de óleos e o tempo restante para completar o mês. Essas novas restrições vão gerar um novo planejamento e sequenciamento de produção, bem como novas condições operacionais para cada batelada. Uma simulação foi realizada utilizando-se o mesmo caso anterior, propondo-se uma redução no preço do gás combustível de R\$0,69 para R\$0,40. Um novo planejamento de produção é calculado, cujo resumo é mostrado na Tabela 7.23.

Uma comparação entre as Tabelas 7.22 e 7.23 mostra que antes do *rescheduling* eram processados os resíduos de ABS e borra de tinta até o máximo permitido pelas restrições de oferta. A maior parte do lucro é com a receita obtida da compra de resíduo de borra de tinta e também da venda de gás combustível. Com o abaixamento do preço do gás combustível de R\$0,69/Kg para R\$0,40/Kg, a diferença mais significativa é na receita decorrente da venda de óleo combustível, que passa a superar a receita com a venda de gás, o que leva a um aumento no

processamento de resíduo de PP até o seu limite máximo, com a redução do número de bateladas com borra de tinta.

Tabela 7-23Resumo do planejamento de produção com *rescheduling*

| N° de bateladas/mês | ABS | Borra de tinta | PP |
|--|-------------------|----------------|--------------------|
| | 15 | 183 | 50 |
| Quantidade de resíduo processado (Kg/mês) | 2442 | 2.815E4 | 7407 |
| Receita com resíduos (R\$/mês) | 366 | 10699 | 1111 |
| Quantidade Óleo Vendido (Kg/mês) | Inflamável | | Combustível |
| | 5188 | | 6857 |
| Receita com venda de óleo (R\$/mês) | 1036 | | 3428 |
| Receita com gás combustível (R\$/mês) | 2556 | | |
| Lucro máximo (R\$/mês) | 17810 | | |
| Tempo de execução | 00:33:57 | | |

As Figuras 7.14 e 7.15 refletem as conseqüências do *rescheduling* sobre o número de bateladas e sobre a quantidade processada de cada resíduo mostrando, a partir do décimo dia do mês, um aumento dessas variáveis para o resíduo de PP com conseqüente redução das reações com borra de tinta. O número de bateladas e a quantidade processada de ABS mantiveram-se inalteradas, uma vez que este resíduo foi inteiramente processado antes do dia da alteração.

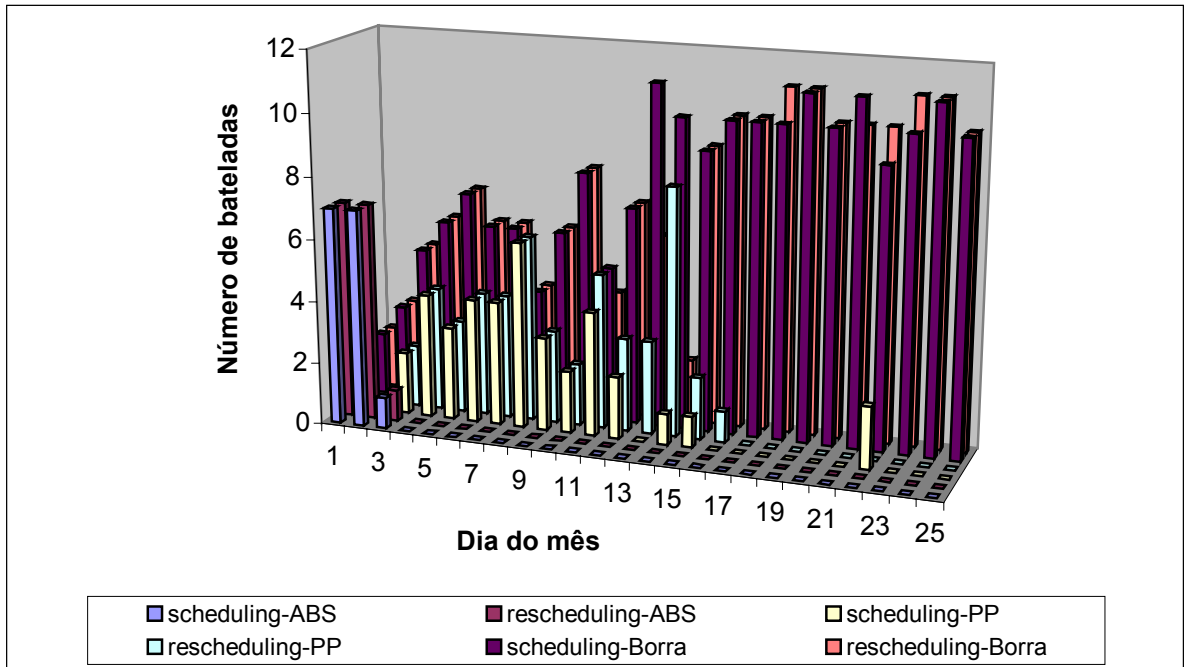


Figura 7-14 Influência do *rescheduling* sobre o número de bateladas de ABS,PP e borra de tinta

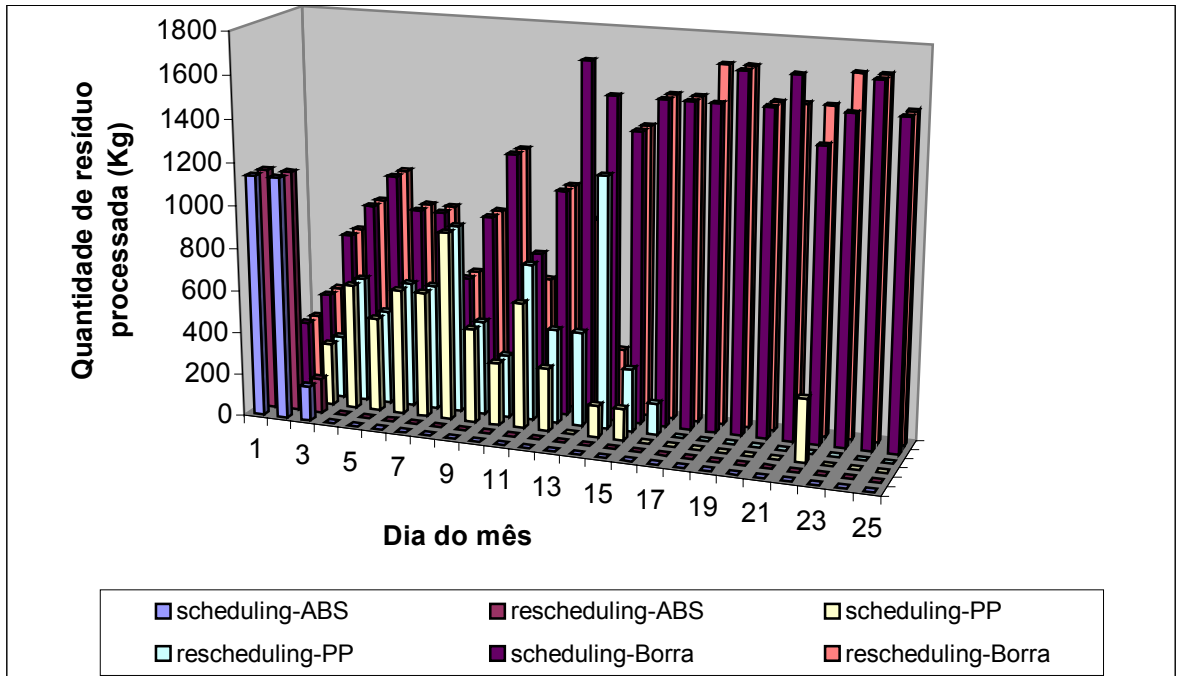


Figura 7-15 Influência do *rescheduling* sobre a quantidade processada de ABS, PP e Borra de Tinta

O *rescheduling* provocou alterações também nas quantidades geradas de óleos, causando um aumento na quantidade produzida de óleo combustível e redução na geração de óleo inflamável, como mostrado nas Figuras 7.16 e 7.17. Um novo sequenciamento, produzido pelo *rescheduling*, a partir do dia 10 do mês, é mostrado no anexo A5.

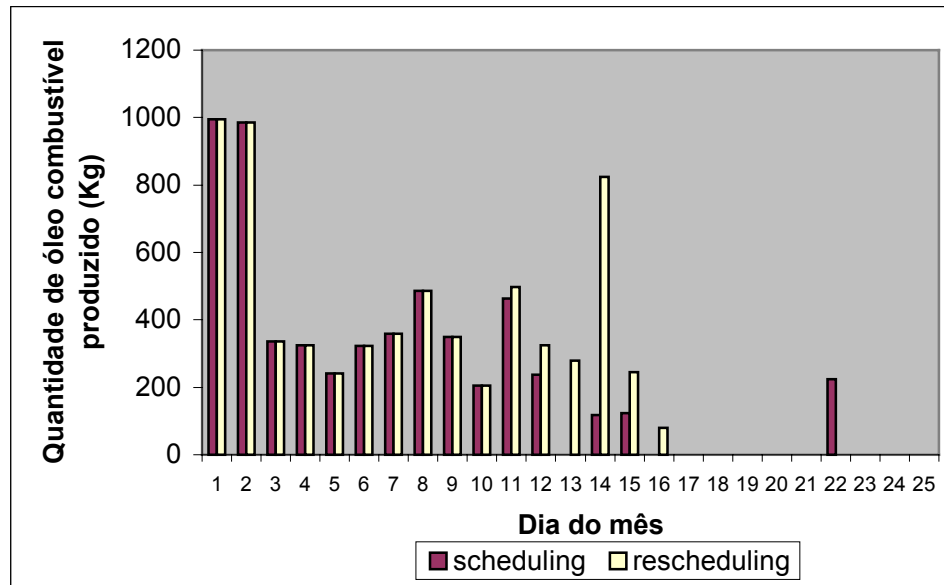


Figura 7-16 Influência do *rescheduling* sobre a quantidade produzida de óleo combustível

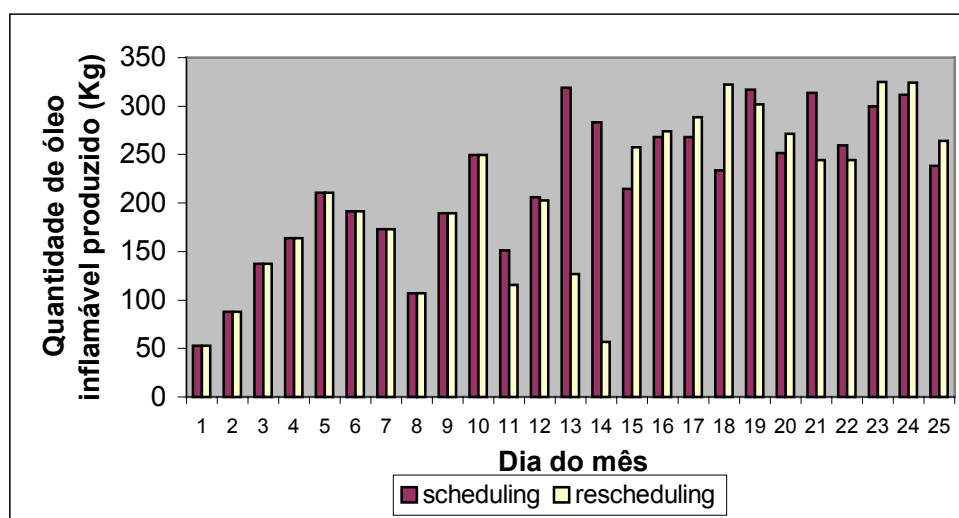


Figura 7-17 Influência do *rescheduling* sobre a quantidade produzida de óleo inflamável

7.4 Viabilidade Econômica

7.4.1 Investimento Total do Capital (ITC)

A estimativa para o investimento total do capital é a denominada estimativa de estudo, isto é, baseada no conhecimento dos principais equipamentos da planta. Este tipo de estimativa possui precisão de $\pm 25\%$. O modelo adotado para o cálculo do investimento total do capital é aquele mostrado pela equação 5.22. Para o caso simulado no capítulo 6, a Tabela 7.24 mostra os custos com os principais equipamentos, obtidos de fornecedores, e a Tabela 7.25 outros custos de investimento mais frequentes usando correlações de Guthrie (DOUGLAS, 1988).

Tabela 7-24 Custos com equipamentos obtidos de fornecedores

| Equipamento | Valores (R\$) |
|--|---------------|
| Tanque de 200L em aço inoxidável 316L, espessura 3mm, com silo caracol e moto redutor, uma boca de inspeção, quatro saídas para termopar, chapa revestimento em aço inoxidável 304, com preenchimento de lã de rocha 50mm, um visor de nível, uma curva 80mm, três metros de tubo 316L, uma chaminé em aço inoxidável 316L, diâmetro interno de 120mm. | 8500,00 |
| Um tanque de 196L em aço inoxidável 316L espessura 3mm, uma boca de inspeção, quatro metros de tubo 316L, três curvas 316L, três cintas de refrigeração=5metros, uma válvula esfera. | 5200,00 |
| Um tanque de 196L em aço inoxidável 316L, espessura 3mm, uma boca de inspeção, uma válvula de segurança em bronze, um visor de nível, três válvulas esfera, três metros de tubo 316L e uma união T. | 5000,00 |
| Um compressor industrial contínuo, para vazão de 0.7 m ³ /min, pressão máxima de 175 libras com reservatório para gás de 425L. | 6489,00 |
| Total | 25189,00 |

Tabela 7-25 Custos de investimento

| | | |
|------|--|--------------|
| I. | Investimento Total do Capital (ITC) | R\$88.489,00 |
| II. | Investimento de Capital Fixo (ICF) | |
| | A. Custos Diretos (CD) | |
| | - Equipamentos on site (CE) | R\$25.189,00 |
| | - Instalação de equipamentos (20%CE) | R\$5.000,00 |
| | - Equipamentos off site (10%CE) | R\$2.500,00 |
| | - Instrumentação e controle (30%CE) | R\$7.500,00 |
| | - Tubulação e válvulas (20%CE) | R\$5.000,00 |
| | - Construção de sistemas de utilidades (10%CE) | R\$2.500,00 |
| | B. Custos Indiretos (CI) | |
| | - Supervisão e engenharia (20%CD) | R\$10.000,00 |
| | - Despesas de construção e contingências (5%ITC) | R\$4.500,00 |
| III. | Capital de Trabalho (20% ITC) | R\$17.500,00 |
| IV. | Custos de start up (10%ITC) | R\$8.800,00 |

O retorno mensal sobre o investimento, calculado pela equação 5.23, é de $ROI = 21,7\%$ a.m.. Esse resultado comparado com o rendimento obtido por outros investimentos mostra a viabilidade econômica de investir na planta de pirólise.

O Capítulo 8 apresenta as principais conclusões sobre os resultados obtidos neste capítulo.

Capítulo 8

Conclusões

Este capítulo apresenta as principais conclusões resultantes do trabalho realizado, destacando as contribuições, análise dos resultados e as perspectivas para trabalhos futuros.

8.1 Contribuições

O destino dos resíduos sólidos industriais é um problema atual que necessita de alternativas imediatas de solução, levando empresários de diversos setores a buscar apoio nas Universidades. Este foi o caso que originou o desenvolvimento deste trabalho. A aplicação de uma metodologia de otimização segura, flexível e viável para um caso real, que mostra viabilidade técnica e econômica de implementação e vai ao encontro das expectativas do setor manufatureiro é a principal contribuição deste trabalho.

8.2 Conclusões dos Resultados

8.2.1 Compostos Orgânicos Voláteis

Os Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) resultantes da pirólise de ABS, PP e borra de tinta apresentaram alto poder calorífico (especialmente ABS e PP), com energia suficiente para

abastecer o próprio processo, e ainda serem vendidos como GLP para fornos industriais. Os gases provenientes da decomposição térmica da borra de tinta não foram bem definidos pelas análises cromatográficas realizadas, devido à complexidade da mistura que compõe esse resíduo, devendo-se realizar melhor caracterização desta fase antes de sua queima.

8.2.2 Óleos

Análises cromatográficas indicaram uma fase líquida, obtida a partir dos resíduos ABS, PP e borra de tinta, rica em solventes e com aspecto de óleo mineral. Os ensaios para a classificação desses óleos, de acordo com as normas da Agência Nacional de Petróleo, caracterizam os óleos gerados a partir de ABS e PP como óleo combustível tipo “E” e os óleos produzidos a partir de borra de tinta, como óleos inflamáveis, devido ao baixo ponto de fulgor (abaixo de 60°C). Os óleos combustíveis podem ser vendidos para abastecer sistemas geradores de vapor da região de estudo, uma vez que possuem características de óleos BPF. Os óleos inflamáveis são de interesse de empresas recuperadoras de solventes.

8.2.3 Viabilidade Econômica

A pesquisa de dados sócio-econômicos e geográficos no município de Caxias do Sul permitiu a aquisição das seguintes informações: tipo, taxa de geração e valor de mercado de resíduos sólidos industriais, além da demanda de óleos combustíveis.

As maiores contribuições para a receita do processo foram devido à aquisição de resíduo de borra de tinta e venda de gás combustível, sendo imprescindível o aproveitamento do gás para abastecimento energético durante as reações de pirólise.

A taxa mensal de retorno sobre o investimento foi de 21,7%, mostrando viabilidade econômica do processo.

8.2.4 Modelagem e Simulação

Os modelos de ajuste para o rendimento de óleo combustível a partir dos resíduos de ABS e PP mostraram que este rendimento foi dependente somente da temperatura da reação na faixa de 450 a 650°C, permitindo reações rápidas e com alto rendimento de óleo. O óleo obtido de resíduo de borra de tinta apresentou rendimento dependente da temperatura e do tempo da reação, para as mesmas condições operacionais dos demais resíduos.

O aparato experimental montado para a coleta de dados energéticos foi satisfatório, sendo sensível às variações da massa de resíduo alimentada, da temperatura e do tempo da reação, com um sistema de aquisição de dados eficiente. Os valores experimentais de energia transiente e permanente concordaram com aqueles obtidos pelo modelo proposto dentro e fora das condições operacionais usadas para ajustar os modelos. O maior desvio entre esses valores foi de 13% para o resíduo de ABS com 600 gramas de massa alimentada e temperatura de 531°C. Para diferentes condições e resíduos, o desvio médio foi de 5%.

Os resultados da simulação mostraram que a planta de pirólise é auto-sustentável em energia. Para o caso em estudo, a planta mostrou-se mais lucrativa devido à venda de gás combustível do que de óleos, considerando o levantamento de dados realizado em campo. Esse comportamento é alterado, como mostra a estratégia de *rescheduling*, quando o valor do gás combustível diminui de R\$0.69 para R\$0.40.

8.2.5 Algoritmos Genéticos

A metodologia usando Algoritmos Genéticos como método de otimização para solucionar simultaneamente planejamento de produção, *scheduling* e condições operacionais, além de possibilitar a realização de *rescheduling*, mostrou-se eficiente para a determinação de uma resposta rápida para as variações das necessidades de mercado, evitando excesso de

energia e gasto de dinheiro, ao mesmo tempo satisfazendo restrições de demanda de óleos, oferta de resíduos e horizonte de tempo.

O método de Algoritmos Genéticos em codificação real mostrou-se fortemente influenciável pela presença dos operadores não convencionais elitismo e escalonamento, sendo recomendado o seu uso. O operador de *crossover* intermediário interpolador piorou significativamente a performance do método quando comparado ao tipo extrapolador com controle de extrapolação, sendo recomendado este procedimento, mesmo com outros tipos de *crossover* em codificação real.

8.3 Conclusão Geral

A metodologia de otimização utilizada, com a determinação simultânea do planejamento de produção e *scheduling* é flexível permitindo *rescheduling* para absorver as variações das necessidades de mercado, capacidade de produção e condições operacionais, dentro de um tempo computacional viável podendo ser usada para vários resíduos, cujo rendimento de produtos e energia envolvida são determinados sem o conhecimento prévio da cinética e do calor das reações de pirólise. A planta de pirólise mostrou-se viável economicamente produzindo óleo e gás combustível, sendo energeticamente autosustentável e com a maior parte da receita gerada pela produção de gás combustível.

8.4 Trabalhos Futuros

A próxima etapa é a implantação da planta piloto proposta neste trabalho. Entretanto, recomenda-se observar e estudar melhor os seguintes fatores:

- a) Os gases resultantes da pirólise com borra de tinta não foram completamente caracterizados, não garantindo a ausência de compostos tóxicos;
- b) Deve-se analisar a presença de compostos nitrogenados nos gases de reação, especialmente com resíduo de ABS, devido a presença do grupo nitrila em sua composição.
- b) Não deve-se pirolisar outros resíduos além daqueles utilizados neste trabalho, uma vez que os produtos resultantes podem ser bem diferentes. No caso de plásticos, cuidado especial deve-se tomar com o PVC, devido à presença de organoclorados;
- c) Foi realizada somente uma análise econômica em nível de estudo, sendo recomendada uma avaliação detalhada, antes da implantação do processo industrial.

Além desses, sugere-se o estudo e aplicação de modelos fenomenológicos, usando os dados experimentais existentes.

Referências Bibliográficas

- ADRIAN M. C.; NICOLA J.; PAUL T.W. - **Recycling of Fibre-Reinforced Polymeric Waste by Pyrolysis: Thermo-Gravimetric and Bench-Scale Investigations.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 70, 2, p. 315-338, 2003.
- ANI F.N.; ISLAM M.N. - **Techno-Economics of Rice Husk Pyrolysis, Conversion With Catalytic Treatment to Produce Liquid Fuel.** Bioresource Technology, 73, p. 67-75, 2000.
- ANP ver AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO.
- ASTM ver AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIAL
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Portaria nº 80**, 30 de abril de 1999.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIAL. **Petroleum Products And Lubricants.** ASTM D 2382-88. Oct. 31, 1988.
- BAKER, T.E. - **A Branch And Bound Network Algorithm For Interactive Process Scheduling.** Math. Prog. Study, 15, 1981.
- BALLICE, L.; REIMERT, R. - **Classification of Volatile Products From the Temperature-Programmed Pyrolysis of Polypropylene (PP), Atactic-Polypropylene (APP) And Thermogravimetrically Derived Kinetics of Pyrolysis.** Chemical Engineering and Processing, 41, p. 289-296, 2002a.
- BALLICE, L.; REIMERT, R. - **Classification of Volatile Products From the Temperature-Programmed Pyrolysis of Polypropylene (PP), Atactic-Polypropylene (APP) And Thermogravimetrically Derived Kinetics of Pyrolysis.** Chemical Engineering and Processing, 41, p. 289-296, 2002b.
- BASSET, M. H.; DAVE, P.; DOYLE, F.J.; KUDVA, G.K.; PEKNY, J.F.; RECKATIS; SUBRAHMANYAM, S.; MILLER, D.L.; ZENTNER, M. G. - **Perspectives On Model Based Integration Of Process Operations.** Computers Engineering, 20, 1996.
- BAEL, V. P. - **A Study of rescheduling strategies and abstraction levels for a chemical process scheduling problem.** Production Planning & Control, 10, 4, p.359-364, 1999.
- BÉBAR, L.; MARTINÁK, P.; HÁJEK, J.; STEHLÍK, P.; HAJNÝ, Z.; ORAL, J. - **Waste To Energy In The Field Of Thermal Processing Of Waste.** Applied Thermal Engineering, 22, p.897-906, 2002.
- BIEGEL, J.; DAVERN, J. - **Genetic Algorithm And Job Shop Scheduling.** Computers Industrial Engineering, 19, 1990.

- BIEGLER, L.; GROSSMANN, E. I.; WESTERBERG, W. A. - **Systematic Methods Of Chemical Process Design**. Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences, 1997.
- BIREWAR, D.B.; GROSSMANN, I. E. - **Simultaneous Production And Scheduling In Multiproduct Batch Plants**. Industrial Engineering Chemistry Research, 29, 1990.
- BOCKHORN, H.; HORNING, A.; HORNING, U.; JAKOBSTRÖER, P. - **Modelling of Isothermal and Dynamic Pyrolysis of Plastics Considering Non-Homogeneous Temperature Distribution and Detailed Degradation Mechanism**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 49, p. 53 – 74, 1999a.
- BOCKHORN, H.; HENTSCHEL, J.; HORNING, A.; HORNING, U. - **Environmental Engineering: Stepwise Pyrolysis of Plastic Waste**. Chemical Engineering Science, 54, p. 3043 – 3051, 1999b.
- BOLSA DE RECICLAGEM. **Boletim Informativo**, ano 1, n 4, p.1-11, set/out –2001.
- BOMBERGER, E. - **A Dynamic Programming Approach To A Lot Size Scheduling Problem**. Management Science, 12, p. 778-784, 1966.
- BOSE, S.; PEKNEY, J.F. - **A Model Predictive Framework For Planning And Scheduling Problems. A Case Study Of Consumer Goods Supply Chain**. Computers and Chemical Engineering, 24, 2000.
- BRANDRUP, J. - **Recycling And Recovery Of Plastics**. New York (EUA): Hanser/Gardner Publications, 1996.
- CÂMARA DA INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE CAXIAS DO SUL. **Dados sócio-econômicos de Caxias do Sul**, 1998.
- CAPUTO, A. C. e PELAGAGGE, P. M. - **RDF Production Plants: I Design and Costs**. Applied Thermal Engineering, 22, p.423-437, 2002a.
- CAPUTO, A. C. e PELAGAGGE, P. M. - **RDF Production Plants: II Economics and Profitability**. Applied Thermal Engineering, 22, p.439-448, 2002b.
- CASTRO, R. E. - **Otimização de Estruturas Via Algoritmos Genéticos**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.
- CHEN C.; VEMPATI, V.; ALJABER, N. - **An Application Of Genetic Algorithms For Flow Shop Problems**. European Journal of Operational Research, 80, 1995.
- CHEN G.; ANDRIES J.; SPLIETHOFF. H. - **Catalytic pyrolysis of biomass for hydrogen rich fuel gas production**. Energy Conversion and Management, 44, 14, p.2289-2296, 2003a.
- CHEN G.Y.; FANG M.X.; ANDRIES J.; LUO Z.Y.; SPLIETHOFF H.; CEN K. - **Kinetics study on biomass pyrolysis for fuel gas production**. Journal of Zhejiang University Science, 4, 4, p.441-447, 2003b.

CHIANG H.L.; CHEN T.C.; TSAI J.J.; HSU Y.C. - **Pollutant Characteristics of the Pyrolysis of Petrochemical Wastewater Sludge by an Electric Furnace.** Water Science And Technology, 42, p. 37-41, 2000.

CIC – ver CÂMARA DA INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE CAXIAS DO SUL.

CLAUMANN, C. A. - **Modelagem Dinâmica E Controle De Processos Não Lineares: Uma Aplicação De Algoritmos Genéticos Para Treinamento De Redes Neurais Recorrentes.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Programa de Pós – Graduação em Engenharia Química, UFSC, Florianópolis SC, Brasil, 1999.

CONESA, J.; FONT, R. - **Kinetic Severity Function as a Test for Kinetic Analysis. Application to Polyethylene Pyrolysis.** Energy & Fuels, 13,p. 678-685, 1999.

COPYRIGHT PROCESS ASSOCIATES OF AMERICA. **Process Designer.** Disponível em: <<http://www.processassociates.com/process/tools.htm>>. Acesso em 2002.

CORREIO DO POVO ver JORNAL CORREIO DO POVO.

CUNLIFFE AM.; JONES N.; WILLIAMS PT. - **Pyrolysis of Composite Plastic Waste.** Environmental Technology, 24, 5, p.653-663, 2003.

DADVAND, N.; LEHRLE, R. S.; PARSONS, I. W.; ROLLINSON, M. - **Use of Pyrolysis-g.c.-m.s. to Asses the Thermal Degradation Behaviour of Polymers Containing Chlorine I. the Limits of Detection and Measumerement of HCl, Deduced From a Study of PVC Pyrolysis.** Polymer Degradation and Stability, 66, p. 247-255, 1999.

DAS, B.P.; RICKARD, J. G.; SHAH, N.; MACCHIETTO, S. - **An Investigation On Integration Of Aggregate Production Planning, Master Production Scheduling And Short-Term Production Scheduling Of Batch Process Operations Through A Common Data Model.** Computers and Chemical Engineering, 24, 2000.

DASGUPTA, D.; MICHALEWICZ, Z. - **Evolutionary Algorithms In Engineering Applications.** Ed. Springer, 1997.

DE JONG, K. A. **An Analysis of the Behavior of a class of Genetic Adaptive System.** Ph.D. dissertation, University of Michigan, ANN Arbor, MI., 1975.

DOBSON, G. - **The Economic Lot Scheduling Problem: Achieving Feasibility Using Time-Varying Lot Sizes.** Openions Research, 35, 5 , p.764-771, 1987.

DONALD, E. S.; DOUGLAS, C. W. - **Planning, Scheduling and Control Systems: Why Can They Not Work Together.** Computers and Chemical Engineering, 24, 2000.

DOUGLAS, J. M. - **Conceptual Design of Chemical Processes.** New York: Mc Graw Hill, 1988.

EMPRESA & AMBIENTE. Fundação Ambiental Sul, ano II, n 2, 1993.

ENSAIO FISCHER. **Procedimento Operacional.** BR Código:PO-PQ-LAB-0034, 2002.

- ERDMAN, A. JR.; JOHNSON, J. - **Low Temperature-Thermal Stripping and Volume Reduction Of Waste Sludges With A Hollow Screw Indirect Heat Exchange Processor.** Environmental Conference, 1988.
- FIGUEIREDO, M.E. - **Reciclagem De Plásticos Termofixos À Base De Resina Poliéster Reforçado Com Fibra De Vidro.** Anais do I Congresso Brasileiro de Polímeros, Universidade de São Carlos, São Paulo, SP, 1991.
- FUNDAÇÃO AMBIENTAL SUL. - **Relatório de Impacto Ambiental – RIMA – Central de Tratamento de Resíduos Industriais.** Ecoplan Engenharia Ltda, Caxias do Sul, 1994.
- FUNDAÇÃO AMBIENTAL SUL. - **Relatório de Impacto Ambiental – RIMA – Central de Tratamento de Resíduos Industriais.** Ecoplan Engenharia Ltda, Caxias do Sul, 1996.
- FUJITA, S. - **The Application Of Marginal Analysis To The Economic Lot Scheduling Problem.** American Institute of Industrial Engineering Transactions, 10, 4, p.354-361, 1978.
- GALLO, B.J.; AGNELLI, A. M. J. - **Aspectos Do Comportamento De Polímeros Em Condições De Incêndio.** Polímeros - Revista Ciência e Tecnologia, São Paulo, SP, p. 23-37, 1998.
- GALVAGNO S.; CASU S.; CSABIANCA T.; CALABRESE A.; CORNACCHIA G. - **Pyrolysis Process for the Treatment of Scraps Tyres: Preliminary Experimental Results.** Waste Management, 22, p.917-923, 2002.
- GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S.; SETHI, R. - **The Complexity Of Flowshop And Jobshop Scheduling.** Mathematical Operations Research, 1, 1976.
- GELDERS, L.S.; VAN WASSENHOVE, L.N. - **Production Planning: A Review.** European Journal Operational Research, 7, 1981.
- GOLDBERG, D. E. - **Genetic Algorithms In Search, Optimization, And Machine Learning.** New York: Addison – Wesley, 1989.
- GUPTA, M.; GUPTA, Y.; KUMAR, A.- **Minimizing Flow Variance In A Single Machine System Using Genetic Algorithms.** European Journal of Operational Research, 70, 1993.
- GRAVES. In: MAZZUCCO, J. J. - **Uma Abordagem Híbrida Do Problema Da Programação da Produção Através Dos Algoritmos Simulated Annealing E Genético.** Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia da Produção, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 1999.
- HAESSLER, R. - **An Improved Extended Basic Period Procedure For Solving The Economic Lot Scheduling Problem.** American Institute of Industrial Engineering Transactions, 11, 4, p-336-340, 1979.
- HAMADA, K.; BABA, T.; SATO, K.; YUFU, M. - **Hybridizing A Genetic Algorithm With Rule Based Reasoning For Production Planning.** IEEE Expert, 10, 1995.

- HAX, A.C. - **Aggregate Production Scheduling**. In: Handbook Of Operations Research Models And Applications. New York: Moder, J.J., Elmaghraby, S.E., Eds., Van Nostrand Reinhold Co., 1978.
- HOLLAND, J. H. - **Adaptation In Natural And Artificial Systems. An Introductory Analysis With Applications To Biology, Control And Artificial Intelligence** In: CLAUMANN, C. A. - Modelagem Dinâmica E Controle de Processos Não Lineares: Uma Aplicação De Algoritmos Genéticos Para Treinamento De Redes Neurais Recorrentes. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 1999.
- IP, W.H.; LI, Y.; MAN, K. F.; TANG, K. S. - **Multi-Product Planning And Scheduling Using Genetic Algorithm Approach**. Computers Industrial Engineering, 38, 2000.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Lixo Municipal**. Manual de Gerenciamento Integrado, CEMPRE, 1ª edição, São Paulo, 1995.
- IPT ver INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS.
- ISLAM M.N.; ZAILANI R.; ANI F.N. - **Pyrolytic Oil From Fluidised Bed Pyrolysis of Oil Palm Shell and Its Characterisation**. Renewable Energy, 17, p. 73-84, 1999.
- JANSE A.M.C.; WESTERHOUT R.W.J.; PRINS W. - **Modelling of Flash Pyrolysis of a Single Wood Particle**. Chemical Engineering and Processing, 39, p. 239-252, 2000.
- JENSEN, M. T. - **Generating Robust and Flexible Job Shop Schedules Using Genetic Algorithms**. IEEE Transactions On Evolutionary Computers, 7, 3, p. 275-288, 2003.
- JORNAL CORREIO DO POVO. **Lixo industrial: só 22% é tratado**. São Paulo, 5 de maio de 2002.
- KAMINSKY, W. - **Recycling Of Polymeric Materials By Pyrolysis**. Makromol. Chem. Macromol. Symp., p. 48-49, 1991.
- KARIMI, I. A.; McDONALD, C.M. - **Planning And Scheduling Of Parallel Semicontinuous Processes. 1. Short – Term Scheduling**. Industrial Engineering Chemistry Research, 36, p. 2701-2714, 1997.
- KIM, B.R. - **Evaluating Paint-Sludges Chars For Adsorption Of Selected Paint Solventes**. Journal of Environmental Engineering, 122, 6, 1996.
- KIM Y.K.; PARK K.; KO J. - **Integration of Process Planning and Job Shop Scheduling**. Computers & Operational Research, 30, 8, p.1151-1171, 2003.
- KHOUSA, M.; MICHALEWICZ, Z.; WILMOT, M. - **The Use Of Genetic Algorithms To Solve The Economic Lot Size Scheduling Problem**. European Journal of Operational Research, 110, 1998.
- KULESZA K.; GERMAN K. - **Chlorinated Pyrolysis Products of Co-Pyrolysis of Poly(Vinyl Chloride) and Poly(Ethylene Terephthalate)**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 67, 1, p.123-134, 2003.

- LAZARO, M.; ESPUNA, A.; PUIGJANER, L. - **A Comprehensive Approach To Production Planning In Multiproduct Batch Plants**. Computers & Chemistry Engineering, 13, 1989.
- LEE, C.; PIRAMUTHU, S.; TSAI, Y. - **Job Shop Scheduling With A Genetic Algorithm And Machine Learning**. International Journal of Production Research, 35, 1997a.
- LEE, I.; SIKORA, R.; SHAW, M. A - **Genetic Algorithm Based Approach To Flexible Flow Line Scheduling With Variable Lot Sizes**. IEEE Transactions Systems, Man, and Cybernetics – Part B: Cybernetics, 27, 1997b.
- LIMA, L. M. Q. - **Lixo – Tratamento e Biorremediação**. São Paulo: Hemus Editora Ltda., p. 161-163, 1991.
- LOVETT, S.; BERRUTI, F.; BEHIE, L.A. - **Ultraprolytic upgrading Of Plastic Wastes And Plastics/Heavy Oil Mixtures To Valuable Light Gas Products**. Industrial Engineering Chemistry, 1997.
- MARONGIU A.; FARAVELLI T.; BOZZANO G.; DENT M.; RANZI E. - **Thermal Degradation of Poly(Vinyl Chloride)**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 70, 2, p. 519-553, 2003.
- MAUDERLI, A. M.; RIPPIN, D.W.T. - **Production Planning and Scheduling for Multipurpose Batch Chemical Plants**. Computers & Chemistry Engineering, 3, 1979.
- MAZZUCCO, J. J. - **Uma Abordagem Híbrida Do Problema Da Programação Da Produção Através Dos Algoritmos Simulated Annealing E Genético**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia da Produção, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 1999.
- MB-48 ver MÉTODO BRASILEIRO MB-48
- McDONALD, C. M.; KARIMI, I. - **Planning And Scheduling Of Parallel Semicontinuous Processes. 1. Production Planning**. Industrial Engineering Chemistry Research, 36, 1997.
- McKENDRY P. - **Energy Production From Biomass. (Part 2): Conversion Technologies**. Bioresource Technology, 83, 1, p-47-54, 2002.
- MELAINE, M. - **An Introduction To Genetic Algorithms**. Cambridge, Massachusetts, London, England: A Bradford Book The MIT Press, 1998.
- MENEGHETTI, A.; NARDIN, G.; SIMEONI, P. - **Waste-to-energy Application In An Industrial District**. Applied Energy, 72, p.443-465, 2002.
- MENGES, G. - **Basis And Technology Of Plastics Recycling**, 4, p.202, 1993.
- MÉTODO BRASILEIRO MB-48. **Determinação do Ponto de Fulgor**. Associação Brasileira de Normas Técnicas – Instituto Brasileiro do Petróleo, 1972.
- MIRANDA M. N. – **Algoritmos Genéticos: Fundamentos e Aplicações**. Disponível em: <<http://www.gta.ufrj.br/~marcio/genetic.html>>. Acesso em 2004.

- MITCHELL, D. B.; CHWEERS, M.E.; HAZ. - **Waste Reduction Using Organic Polymers.** Pollution Engineering, 21, 3, 1989.
- MORRISON, R.; BOYD, R. - **Química orgânica.** Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, p.146, 1993.
- MOUSQUÈS, P.; DIRION, J.L.; GROUSET, D. - **Modeling of Solid Particles Pyrolysis.** *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 58-59, p. 733 – 745, 2001.
- NAKOUZI, S. - **Novel Approach To Paint Sludge Recycling: Reclaiming Of Paint Sludge Components As Ceramic Composites And Their Applications In Reinforcement Of Metals And Polymers.** *Journal of Materials Research*, 13, 1, 1998.
- NBR 1004 – **Resíduos Sólidos – Classificação.** Disponível em <<http://www.fenix-ambiental.com.br/Residuos%20Solidos.pdf>>. Acesso em 2003.
- NOVICKI, R.E. - Retortagem de Pneus pelo Processo PETROSIX, Petróleo Brasileiro S.A., 2000.
- OCHI, L.S. - **Algoritmos Genéticos: Origem e Evolução.** Disponível em:
<<http://info.lncc.br/sbmac/com-fig/public/bol/BOL-2/artigos/satoru/satoru.html>>. Acesso em 2002.
- OH, H. C.; KARIMI, I.A. - **Planning Production On A Single Processor With Sequence-Dependent Setups Part 1: Determination Of Campaigns.** *Computers and Chemical Engineering*, 25, 2001.
- OH, H. C.; KARIMI, I. A. - **Planning Production On A Single Processor With Sequence-Dependent Setups Part 2: Campaigns Sequencing And Scheduling.** *Computers and Chemical Engineering*, 25, 2001.
- P-MB-454. **Método de Ensaio para Determinação do Poder Calorífico em Produtos Líquidos de Petróleo.** Associação Brasileira de Normas Técnicas – Instituto Brasileiro do Petróleo, 1968.
- PETKOV, S. B.; MARNAS, C.D. - **Multiperiod Planning And Scheduling Of Multiproduct Batch Plants Under Demand Uncertainty.** *Industrial Engineering Chemistry Research*, 36, 1997.
- POHLHEIM, H. - **GEATbx: Genetic And Evolutionary Algorithm Toolbox For Use With Matlab.** Disponível em <<http://www.systemtechnik.tuilmnau.de/~pohlheim/GAToolbox/index.html>>
- PORTARIA N°80 ver AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO.
- PROCESS DESIGNER ver COPYRIGHT PROCESS ASSOCIATES OF AMERICA.
- RANZI E.; DENTE M.; GOLDANIGA A.; BOZZANO G.; FARAVELLI T. - **Lumping Procedures in Detailed Kinetic Modeling of Gasification Pyrolysis, Partial Oxidation and Combustion of Hydrocarbon Mixtures.** *Progress in Energy and Combustion Science*, 27, p. 99-139, 2001.

- REEVES, C. - **A Genetic Algorithm For Flowshop Sequencing**. Computers Operations Research, 22, 1995.
- REGULAMENTO TÉCNICO ver PORTARIA Nº80.
- RGP – ver SCHNEIDER et al.
- RIBEIRO, A. D.; VASATA, M.; SCHNEIDER A. M. – **Algoritmos Genéticos Aplicados a Robôs Móveis e Autônomos**. Disponível em: <http://www.inf.uri.com.br/algoritmos_geneticos.htm>. Acesso em 2003.
- SEBASTIAN, M.; DOBOSZ, J. R. - **Thermoanalytical Investigation Of Some Industrial Wastes Produced In Steel Works**. Journal of Thermal Analysis, 33, 2, 1988.
- SCHNEIDER E. V.; SCIENZA C. L.; MANDELLI R. R.; ZATTERA J. A.; MUNIZ R. A. L.; SCHUUR G.; BEAL L. L.; PANAROTTO T. C.; PESSIN N.; COSTA A. R.; FREIRE E.; CARVALHO A. G. - **Diagnósticos de Resíduos Perigosos no Município de Caxias do Sul – Fase I**. Relatório interno, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, RS, 2003.
- SHOBRYNS, D. E.; WHITE, D. C. - **Planning, Scheduling And Control Systems. Why Can They Not Work Together**. Computers and Chemical Engineering, 24, 2000.
- SIKORA, R. - **A Genetic Algorithm For Integrating Lot-Sizing And Sequencing In Scheduling A Capacited Flow Line**. Computers & Industrial Engineering, 30, 1996.
- SRIKANTH K. I.; BARKHA S. - **Improved Genetic Algorithm for the Permutation Flowshop Scheduling Problem**. Computers & Operational Research, 31, 4, p.593-606, 2004.
- SUSARA A.; GROSSMANN E. I. - **A Strategy for the Integration of Production Planning and Reactive Scheduling in the Optimization of a Hydrogen Supply Network**. Computers & Chemical Engineering, 27, 12, p.1813-1839, 2003.
- TALLADA B.; MD. A.U.; KAZUYA M.; JUN K.; KENJI H.; TOSHIAKI K.; AKINORI M.; YUSAKU S. - **Comparison of themal degradation products from real municipal waste plastic and model mixed plastics**. Jornal of Analytical and Applied Pyrolysis, 70, 2, p.579-587, 2003.
- UEM, ver UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ.
- UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ - **Algoritmos Genéticos**, 2004. Disponível em: <<http://www.din.uem.br/ia/geneticos>>. Acesso em 2004.
- WANG C.; ZHAO X. - **Ants Foraging Mechanism in the Design of Multiproduct Batch Chemical Process**. Industrial and Engineering Chemistry Research, 41, 26, p.6678-6686, 2002.
- WANG, D.; FANG, S. - **A Genetic Based Approach For Aggregated Production Planning In A Fuzzy Environment**. IEEE Transactions Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems And Humans, 27, 1997.

- WANG, K.; LOHL, T.; STOBBE, M.; ENGELL, S. - **A Genetic Algorithm For OnLine Scheduling Of A Multiproduct Polymer Batch Plant.** Computers and Chemical Engineering, 24, 2000.
- WILLIAN H.; PING J. - **Component Scheduling for Chip Shooter Machines: a Hybrid Genetic algorithm Approach.** Computers & Operatinal Research, 30, 14 p. 2175-2189, 2003.
- WINKLER. In: LIMA, L.M.Q. - **Lixo – Tratamento e Biorremediação.** São Paulo (SP), Hemus Editora Ltda., p. 161-163, 1991.
- ZENTNER, M. G.; PEKNY, J. F.; REKLAITIS, G.V.; GRUPTA, J .N. D. - **Practical Considerations In Using Model-Based Optimization For The Scheduling And Planning Of Batch – Semicontinuous Processes.** Journal of Processes Control, 4, 4, 1994.
- ZHANG, F.; ZHANG, Y.; NEE, A. - **Using Genetic Algorithms In Process Planning For Job Shop Machining.** IEEE Transactions Evolutionary Computers, 1, 1997.

Sites Consultados

APARECIDO P. L. – **P versus NP**. Disponível em: <<http://www2.dm.ufscar.br/hp/hp501/hp501001/hp501001.html>>. Acesso em 2004.

AGUIAR M. S. – **Teoria da Complexidade**, 2000. Disponível na internet In: <<http://www.inf.ufrgs.br/~ctg/pags/definicoes/node10.html>>. Acesso em 2004.

EVOLUTIONARY COMPUTATIONAL DISCIPLINES. Disponível na Internet In: <http://www.kneehighs.com/related.html>. Acesso em 2003.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - **Gerenciamento de Resíduos Industriais**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/sqa/prorisc/residuos/corpo.html>> e <<http://www.mma.gov.br/port/sqa/prorisc/residuos/resperi.html>>. Acesso em 2003

Anexos

ANEXO A 1 - Cromatograma típico para a fase gasosa da "borra de tinta"

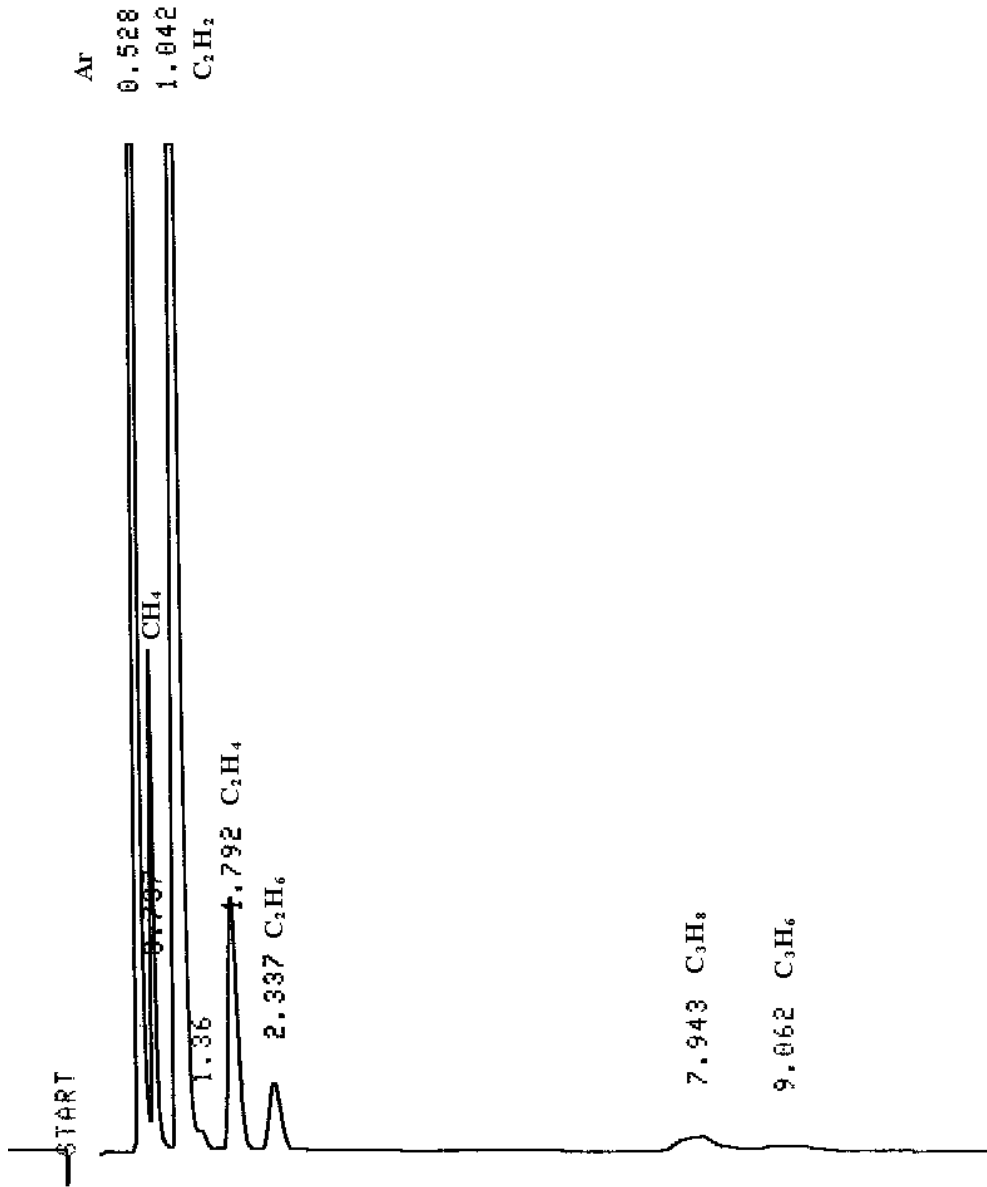
ANEXO A 2 - Cromatograma típico para a fase gasosa do resíduo ABS

ANEXO A 3 - Cromatograma típico para a fase gasosa do resíduo PP

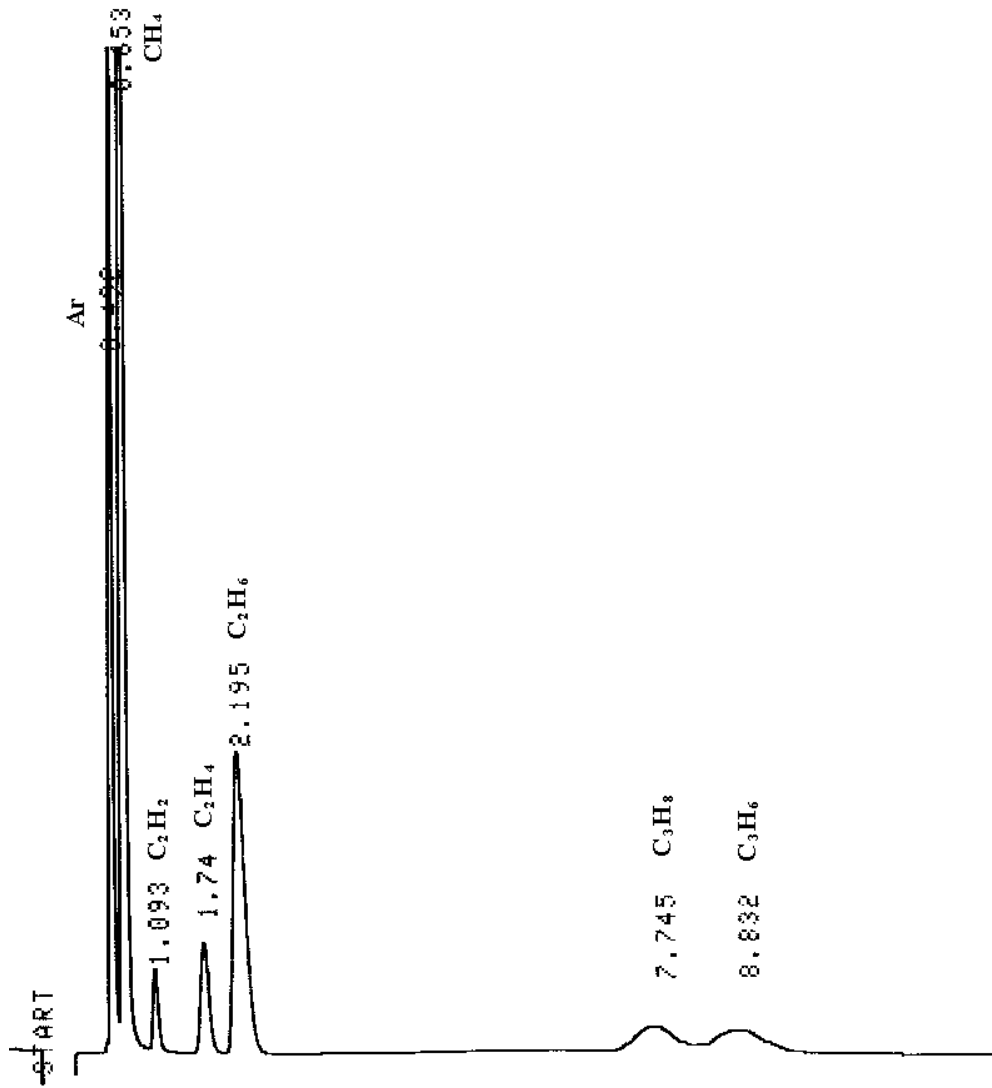
ANEXO A 4 - Sequenciamento de Produção para população de 100 indivíduos e 2000 gerações.

ANEXO A 5 - Sequenciamento de Produção com *rescheduling* para população de 100 indivíduos e 2000 gerações.

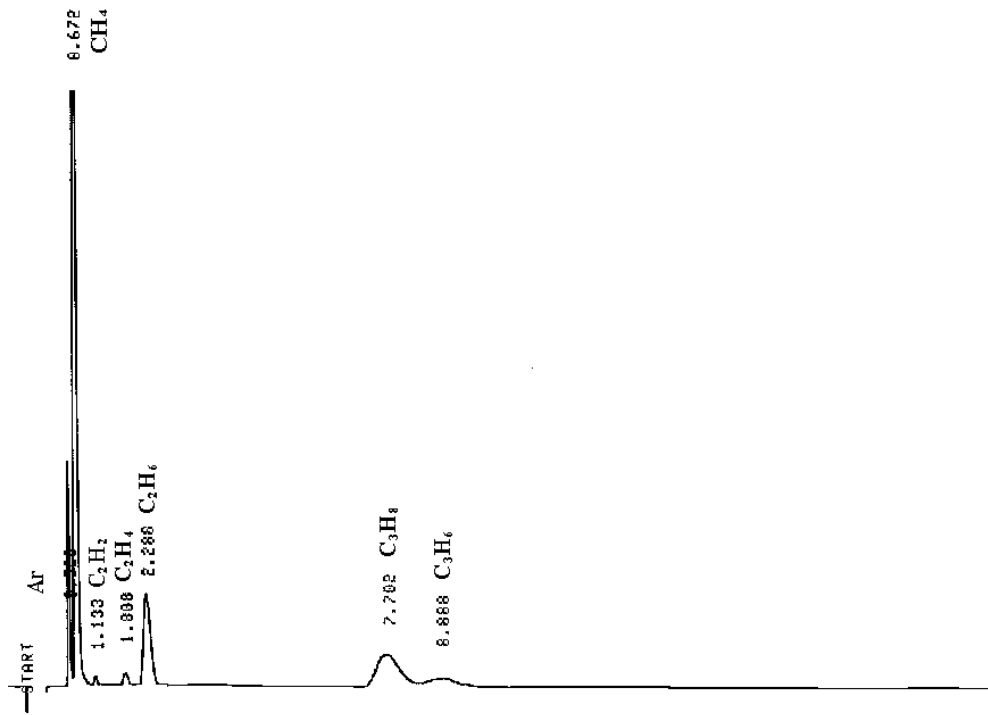
ANEXO A 1 Cromatograma típico para a fase gasosa da borra de tinta



ANEXO A 2 Cromatograma típico para a fase gasosa do resíduo ABS



ANEXO A 3 Cromatograma típico para a fase gasosa do resíduo PP



ANEXO A 4 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| Dia do mês | Tipo de resíduo | Temperatura (°C) | Tempo de reação (min) | Tempo de "set up" (min) | Tempo p/ Início da reação (min) |
|------------|-----------------|------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------------|
| 1 | ABS | 551,7 | 35 | 10 | 28 |
| 1 | ABS | 551,7 | 30 | 10 | 25 |
| 1 | ABS | 551,7 | 32 | 10 | 25 |
| 1 | BORRA | 569,2 | 28 | 10 | 30 |
| 1 | ABS | 551,7 | 5 | 10 | 25 |
| 1 | ABS | 551,7 | 5 | 10 | 25 |
| 1 | BORRA | 569,2 | 6 | 10 | 30 |
| 1 | ABS | 551,7 | 6 | 10 | 25 |
| 1 | ABS | 551,7 | 5 | 10 | 25 |
| 2 | ABS | 544,0 | 13 | 10 | 27 |
| 2 | BORRA | 553,5 | 26 | 10 | 29 |
| 2 | BORRA | 553,5 | 5 | 10 | 29 |
| 2 | ABS | 544,0 | 5 | 10 | 25 |
| 2 | ABS | 544,0 | 7 | 10 | 25 |
| 2 | BORRA | 553,5 | 18 | 10 | 29 |
| 2 | ABS | 544,0 | 5 | 10 | 25 |
| 2 | ABS | 544,0 | 15 | 10 | 25 |
| 2 | ABS | 544,0 | 5 | 10 | 25 |
| 2 | ABS | 544,0 | 18 | 10 | 25 |
| 3 | ABS | 450,0 | 19 | 10 | 21 |

continua Anexo A4 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | | |
|---|-------|-------|----|----|----|
| 3 | BORRA | 610,3 | 19 | 10 | 34 |
| 3 | BORRA | 610,3 | 16 | 10 | 33 |
| 3 | BORRA | 610,3 | 16 | 10 | 33 |
| 3 | BORRA | 610,3 | 18 | 10 | 33 |
| 3 | BORRA | 610,3 | 16 | 10 | 33 |
| 3 | PP | 617,4 | 10 | 10 | 44 |
| 3 | PP | 617,4 | 9 | 10 | 44 |
| 4 | BORRA | 554,7 | 5 | 10 | 31 |
| 4 | PP | 451,0 | 8 | 10 | 24 |
| 4 | PP | 451,0 | 5 | 10 | 25 |
| 4 | PP | 451,0 | 7 | 10 | 25 |
| 4 | BORRA | 554,7 | 9 | 10 | 29 |
| 4 | BORRA | 554,7 | 23 | 10 | 29 |
| 4 | PP | 451,0 | 28 | 10 | 24 |
| 4 | BORRA | 554,7 | 11 | 10 | 29 |
| 4 | BORRA | 554,7 | 6 | 10 | 29 |
| 4 | BORRA | 554,7 | 6 | 10 | 29 |
| 5 | PP | 450,0 | 32 | 10 | 27 |
| 5 | BORRA | 476,2 | 22 | 10 | 23 |
| 5 | BORRA | 476,2 | 15 | 10 | 23 |
| 5 | BORRA | 476,2 | 12 | 10 | 23 |
| 5 | BORRA | 476,2 | 16 | 10 | 23 |
| 5 | BORRA | 476,2 | 13 | 10 | 23 |
| 5 | BORRA | 476,2 | 6 | 10 | 23 |

continua Anexo A4 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | | |
|---|-------|-------|----|----|----|
| 5 | PP | 450,0 | 5 | 10 | 24 |
| 5 | PP | 450,0 | 15 | 10 | 25 |
| 5 | BORRA | 476,2 | 8 | 10 | 23 |
| 6 | BORRA | 474,8 | 25 | 10 | 25 |
| 6 | BORRA | 474,8 | 25 | | |
| 6 | BORRA | 474,8 | 27 | 10 | 23 |
| 6 | PP | 450,0 | 25 | 10 | 24 |
| 6 | BORRA | 474,8 | 9 | 10 | 23 |
| 6 | BORRA | 474,8 | 9 | 10 | 23 |
| 6 | PP | 450,0 | 8 | 10 | 24 |
| 6 | PP | 450,0 | 11 | 10 | 25 |
| 6 | PP | 450,0 | 8 | 10 | 25 |
| 6 | BORRA | 474,8 | 29 | 10 | 23 |
| 7 | BORRA | 501,1 | 5 | 10 | 27 |
| 7 | PP | 462,6 | 9 | 10 | 25 |
| 7 | BORRA | 501,1 | 10 | 10 | 25 |
| 7 | PP | 462,6 | 32 | 10 | 25 |
| 7 | PP | 462,6 | 14 | 10 | 26 |
| 7 | BORRA | 501,1 | 5 | 10 | 25 |
| 7 | BORRA | 501,1 | 9 | 10 | 25 |
| 7 | PP | 462,6 | 33 | 10 | 25 |
| 7 | BORRA | 501,1 | 5 | 10 | 25 |
| 7 | BORRA | 501,1 | 5 | 10 | 25 |
| 8 | PP | 450,6 | 29 | 10 | 27 |

continua Anexo A4 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | | |
|----|-------|-------|----|----|----|
| 8 | BORRA | 558,1 | 20 | 10 | 29 |
| 8 | PP | 450,6 | 6 | 10 | 24 |
| 8 | PP | 450,6 | 8 | 10 | 25 |
| 8 | PP | 450,6 | 10 | 10 | 25 |
| 8 | PP | 450,6 | 19 | 10 | 25 |
| 8 | BORRA | 558,1 | 6 | 10 | 29 |
| 8 | PP | 450,6 | 5 | 10 | 24 |
| 8 | BORRA | 558,1 | 5 | 10 | 29 |
| 8 | BORRA | 558,1 | 6 | 10 | 29 |
| 9 | BORRA | 512,6 | 11 | 10 | 28 |
| 9 | PP | 515,0 | 15 | 10 | 31 |
| 9 | BORRA | 512,6 | 13 | 10 | 25 |
| 9 | PP | 515,0 | 6 | 10 | 31 |
| 9 | BORRA | 512,6 | 21 | 10 | 25 |
| 9 | BORRA | 512,6 | 7 | 10 | 25 |
| 9 | BORRA | 512,6 | 25 | 10 | 25 |
| 9 | BORRA | 512,6 | 36 | 10 | 25 |
| 9 | PP | 515,0 | 8 | 10 | 31 |
| 10 | PP | 483,4 | 8 | 10 | 30 |
| 10 | BORRA | 510,9 | 16 | 10 | 25 |
| 10 | BORRA | 510,9 | 25 | 10 | 25 |
| 10 | BORRA | 510,9 | 10 | 10 | 25 |
| 10 | BORRA | 510,9 | 7 | 10 | 25 |
| 10 | PP | 483,4 | 14 | 10 | 28 |

continua Anexo A4 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | | |
|----|-------|-------|----|----|----|
| 10 | BORRA | 510,9 | 5 | 10 | 25 |
| 10 | BORRA | 510,9 | 22 | 10 | 25 |
| 10 | BORRA | 510,9 | 5 | 10 | 25 |
| 10 | BORRA | 510,9 | 7 | 10 | 25 |
| 11 | BORRA | 522,1 | 15 | 10 | 29 |
| 11 | PP | 512,7 | 9 | 10 | 31 |
| 11 | PP | 512,7 | 14 | 10 | 31 |
| 11 | BORRA | 522,1 | 33 | 10 | 26 |
| 11 | PP | 512,7 | 6 | 10 | 31 |
| 11 | BORRA | 522,1 | 8 | 10 | 26 |
| 11 | PP | 512,7 | 16 | 10 | 31 |
| 11 | BORRA | 522,1 | 15 | 10 | 26 |
| 11 | BORRA | 522,1 | 12 | 10 | 26 |
| 12 | PP | 603,8 | 5 | 10 | 46 |
| 12 | BORRA | 529,6 | 11 | 10 | 26 |
| 12 | BORRA | 529,6 | 5 | 10 | 27 |
| 12 | BORRA | 529,6 | 6 | 10 | 27 |
| 12 | PP | 603,8 | 16 | 10 | 43 |
| 12 | BORRA | 529,6 | 6 | 10 | 26 |
| 12 | BORRA | 529,6 | 7 | 10 | 27 |
| 12 | BORRA | 529,6 | 52 | 10 | 27 |
| 12 | BORRA | 529,6 | 5 | 10 | 27 |
| 13 | BORRA | 513,2 | 20 | 10 | 28 |
| 13 | BORRA | 513,2 | 13 | 10 | 25 |

continua Anexo A4 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | | |
|----|-------|-------|----|----|----|
| 13 | BORRA | 513,2 | 5 | 10 | 25 |
| 13 | BORRA | 513,2 | 5 | 10 | 25 |
| 13 | BORRA | 513,2 | 7 | 10 | 25 |
| 13 | BORRA | 513,2 | 7 | 10 | 25 |
| 13 | BORRA | 513,2 | 6 | 10 | 25 |
| 13 | BORRA | 513,2 | 6 | 10 | 25 |
| 13 | BORRA | 513,2 | 5 | 10 | 25 |
| 13 | BORRA | 513,2 | 9 | 10 | 25 |
| 13 | BORRA | 513,2 | 5 | 10 | 25 |
| 14 | BORRA | 522,5 | 5 | 10 | 29 |
| 14 | BORRA | 522,5 | 5 | 10 | 26 |
| 14 | BORRA | 522,5 | 6 | 10 | 26 |
| 14 | BORRA | 522,5 | 5 | 10 | 26 |
| 14 | BORRA | 522,5 | 6 | 10 | 26 |
| 14 | BORRA | 522,5 | 5 | 10 | 26 |
| 14 | PP | 518,5 | 5 | 10 | 31 |
| 14 | BORRA | 522,5 | 5 | 10 | 26 |
| 14 | BORRA | 522,5 | 14 | 10 | 26 |
| 14 | BORRA | 522,5 | 10 | 10 | 26 |
| 14 | BORRA | 522,5 | 5 | 10 | 26 |
| 15 | BORRA | 581,6 | 6 | 10 | 34 |
| 15 | BORRA | 581,6 | 6 | 10 | 31 |
| 15 | PP | 581,6 | 5 | 10 | 39 |
| 15 | BORRA | 581,6 | 5 | 10 | 31 |

continua Anexo A4 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | | |
|----|-------|-------|----|----|----|
| 15 | BORRA | 581,6 | 5 | 10 | 31 |
| 15 | BORRA | 581,6 | 6 | 10 | 31 |
| 15 | BORRA | 581,6 | 5 | 10 | 31 |
| 15 | BORRA | 581,6 | 5 | 10 | 31 |
| 15 | BORRA | 581,6 | 10 | 10 | 31 |
| 15 | BORRA | 581,6 | 9 | 10 | 31 |
| 16 | BORRA | 545,7 | 12 | 10 | 31 |
| 16 | BORRA | 545,7 | 6 | 10 | 28 |
| 16 | BORRA | 545,7 | 5 | 10 | 28 |
| 16 | BORRA | 545,7 | 5 | 10 | 28 |
| 16 | BORRA | 631,9 | 7 | 10 | 36 |
| 16 | BORRA | 545,7 | 23 | 10 | 27 |
| 16 | BORRA | 545,7 | 5 | 10 | 28 |
| 16 | BORRA | 545,7 | 16 | 10 | 28 |
| 16 | BORRA | 545,7 | 6 | 10 | 28 |
| 16 | BORRA | 545,7 | 5 | 10 | 28 |
| 17 | BORRA | 558,0 | 5 | 10 | 32 |
| 17 | BORRA | 558,0 | 25 | 10 | 29 |
| 17 | BORRA | 558,0 | 7 | 10 | 29 |
| 17 | BORRA | 558,0 | 5 | 10 | 29 |
| 17 | BORRA | 558,0 | 7 | 10 | 29 |
| 17 | BORRA | 558,0 | 11 | 10 | 29 |
| 17 | BORRA | 558,0 | 6 | 10 | 29 |
| 17 | BORRA | 558,0 | 6 | 10 | 29 |

continua Anexo A4 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | | |
|----|-------|-------|----|----|----|
| 17 | BORRA | 558,0 | 5 | 10 | 29 |
| 17 | BORRA | 558,0 | 11 | 10 | 29 |
| 18 | BORRA | 586,6 | 5 | 10 | 34 |
| 18 | BORRA | 586,6 | 5 | 10 | 31 |
| 18 | BORRA | 586,6 | 5 | 10 | 31 |
| 18 | BORRA | 586,6 | 5 | 10 | 31 |
| 18 | BORRA | 586,6 | 5 | 10 | 31 |
| 18 | BORRA | 586,6 | 5 | 10 | 31 |
| 18 | BORRA | 586,6 | 18 | 10 | 31 |
| 18 | BORRA | 586,6 | 5 | 10 | 31 |
| 18 | BORRA | 586,6 | 5 | 10 | 31 |
| 18 | BORRA | 586,6 | 5 | 10 | 31 |
| 18 | BORRA | 586,6 | 5 | 10 | 31 |
| 18 | BORRA | 586,6 | 5 | 10 | 31 |
| 19 | BORRA | 518,4 | 8 | 10 | 28 |
| 19 | BORRA | 518,4 | 5 | 10 | 26 |
| 19 | BORRA | 518,4 | 12 | 10 | 26 |
| 19 | BORRA | 518,4 | 6 | 10 | 26 |
| 19 | BORRA | 518,4 | 9 | 10 | 26 |
| 19 | BORRA | 518,4 | 6 | 10 | 26 |
| 19 | BORRA | 518,4 | 6 | 10 | 26 |
| 19 | BORRA | 518,4 | 5 | 10 | 26 |
| 19 | BORRA | 518,4 | 11 | 10 | 26 |
| 19 | BORRA | 518,4 | 5 | 10 | 26 |
| 19 | BORRA | 518,4 | 10 | 10 | 26 |
| 20 | BORRA | 572,3 | 12 | 10 | 33 |

continua Anexo A4 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | | |
|----|-------|-------|----|----|----|
| 20 | BORRA | 572,3 | 8 | 10 | 30 |
| 20 | BORRA | 572,3 | 7 | 10 | 30 |
| 20 | BORRA | 572,3 | 5 | 10 | 30 |
| 20 | BORRA | 572,3 | 13 | 10 | 30 |
| 20 | BORRA | 572,3 | 5 | 10 | 30 |
| 20 | BORRA | 572,3 | 5 | 10 | 30 |
| 20 | BORRA | 572,3 | 6 | 10 | 30 |
| 20 | BORRA | 572,3 | 6 | 10 | 30 |
| 20 | BORRA | 572,3 | 8 | 10 | 30 |
| 21 | BORRA | 520,6 | 8 | 10 | 28 |
| 21 | BORRA | 520,6 | 9 | 10 | 26 |
| 21 | BORRA | 520,6 | 8 | 10 | 26 |
| 21 | BORRA | 520,6 | 10 | 10 | 26 |
| 21 | BORRA | 520,6 | 5 | 10 | 26 |
| 21 | BORRA | 520,6 | 5 | 10 | 26 |
| 21 | BORRA | 520,6 | 5 | 10 | 26 |
| 21 | BORRA | 520,6 | 5 | 10 | 26 |
| 21 | BORRA | 520,6 | 8 | 10 | 26 |
| 21 | BORRA | 520,6 | 6 | 10 | 26 |
| 21 | BORRA | 520,6 | 8 | 10 | 26 |
| 22 | BORRA | 503,9 | 8 | 10 | 27 |
| 22 | BORRA | 503,9 | 6 | 10 | 25 |
| 22 | BORRA | 503,9 | 11 | 10 | 25 |
| 22 | BORRA | 503,9 | 6 | 10 | 25 |

continua Anexo A4 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | | |
|----|-------|-------|----|----|----|
| 22 | BORRA | 503,9 | 5 | 10 | 25 |
| 22 | BORRA | 503,9 | 6 | 10 | 25 |
| 22 | PP | 503,9 | 5 | 10 | 30 |
| 22 | BORRA | 503,9 | 6 | 10 | 25 |
| 22 | BORRA | 503,9 | 6 | 10 | 25 |
| 22 | BORRA | 503,9 | 6 | 10 | 25 |
| 22 | PP | 503,9 | 10 | 10 | 30 |
| 23 | BORRA | 528,6 | 16 | 10 | 29 |
| 23 | BORRA | 528,6 | 5 | 10 | 27 |
| 23 | BORRA | 528,6 | 20 | 10 | 27 |
| 23 | BORRA | 528,6 | 5 | 10 | 27 |
| 23 | BORRA | 528,6 | 18 | 10 | 27 |
| 23 | BORRA | 528,6 | 19 | 10 | 27 |
| 23 | BORRA | 528,6 | 6 | 10 | 27 |
| 23 | BORRA | 528,6 | 5 | 10 | 27 |
| 23 | BORRA | 528,6 | 6 | 10 | 27 |
| 23 | BORRA | 528,6 | 6 | 10 | 27 |
| 24 | BORRA | 526,7 | 9 | 10 | 29 |
| 24 | BORRA | 526,7 | 8 | 10 | 26 |
| 24 | BORRA | 526,7 | 8 | 10 | 26 |
| 24 | BORRA | 526,7 | 6 | 10 | 26 |
| 24 | BORRA | 526,7 | 6 | 10 | 26 |
| 24 | BORRA | 526,7 | 7 | 10 | 26 |
| 24 | BORRA | 526,7 | 5 | 10 | 26 |

continua Anexo A4 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | | |
|----|-------|-------|----|----|----|
| 24 | BORRA | 526,7 | 8 | 10 | 26 |
| 24 | BORRA | 526,7 | 9 | 10 | 26 |
| 24 | BORRA | 526,7 | 5 | 10 | 26 |
| 24 | BORRA | 526,7 | 5 | 10 | 26 |
| 25 | BORRA | 583,3 | 10 | 10 | 34 |
| 25 | BORRA | 583,3 | 10 | 10 | 31 |
| 25 | BORRA | 583,3 | 6 | 10 | 31 |
| 25 | BORRA | 583,3 | 7 | 10 | 31 |
| 25 | BORRA | 583,3 | 6 | 10 | 31 |
| 25 | BORRA | 583,3 | 6 | 10 | 31 |
| 25 | BORRA | 583,3 | 5 | 10 | 31 |
| 25 | BORRA | 583,3 | 8 | 10 | 31 |
| 25 | BORRA | 583,3 | 5 | 10 | 31 |
| 25 | BORRA | 583,3 | 5 | 10 | 31 |

ANEXO A 5 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para *rescheduling* com população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| Dia do mês | Tipo de resíduo | Temperatura (°C) | Tempo de reação (min) | Tempo de "set up" (min) | Tempo p/ início da reação (min) |
|------------|-----------------|------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------------|
| 1 | ABS | 551,7 | 35 | 10 | 28 |
| 1 | ABS | 551,7 | 30 | 10 | 25 |
| 1 | ABS | 551,7 | 32 | 10 | 25 |
| 1 | BORRA | 569,2 | 28 | 10 | 30 |
| 1 | ABS | 551,7 | 5 | 10 | 25 |
| 1 | ABS | 551,7 | 5 | 10 | 25 |
| 1 | BORRA | 569,2 | 6 | 10 | 30 |
| 1 | ABS | 551,7 | 6 | 10 | 25 |
| 1 | ABS | 551,7 | 5 | 10 | 25 |
| 2 | ABS | 544,0 | 13 | 10 | 27 |
| 2 | BORRA | 553,5 | 26 | 10 | 29 |
| 2 | BORRA | 553,5 | 5 | 10 | 29 |
| 2 | ABS | 544,0 | 5 | 10 | 25 |
| 2 | ABS | 544,0 | 7 | 10 | 25 |
| 2 | BORRA | 553,5 | 18 | 10 | 29 |
| 2 | ABS | 544,0 | 5 | 10 | 25 |
| 2 | ABS | 544,0 | 15 | 10 | 25 |
| 2 | ABS | 544,0 | 5 | 10 | 25 |
| 2 | ABS | 544,0 | 18 | 10 | 25 |
| 3 | ABS | 450,0 | 19 | 10 | 21 |

continua ANEXO A5 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para *rescheduling* com população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | | |
|---|-------|-------|----|----|----|
| 3 | BORRA | 610,3 | 19 | 10 | 34 |
| 3 | BORRA | 610,3 | 16 | 10 | 33 |
| 3 | BORRA | 610,3 | 16 | 10 | 33 |
| 3 | BORRA | 610,3 | 18 | 10 | 33 |
| 3 | BORRA | 610,3 | 16 | 10 | 33 |
| 3 | PP | 617,4 | 10 | 10 | 44 |
| 3 | PP | 617,4 | 9 | 10 | 44 |
| 4 | BORRA | 554,7 | 5 | 10 | 31 |
| 4 | PP | 451,0 | 8 | 10 | 24 |
| 4 | PP | 451,0 | 5 | 10 | 25 |
| 4 | PP | 451,0 | 7 | 10 | 25 |
| 4 | BORRA | 554,7 | 9 | 10 | 29 |
| 4 | BORRA | 554,7 | 23 | 10 | 29 |
| 4 | PP | 451,0 | 28 | 10 | 24 |
| 4 | BORRA | 554,7 | 11 | 10 | 29 |
| 4 | BORRA | 554,7 | 6 | 10 | 29 |
| 4 | BORRA | 554,7 | 6 | 10 | 29 |
| 5 | PP | 450,0 | 32 | 10 | 27 |
| 5 | BORRA | 476,2 | 22 | 10 | 23 |
| 5 | BORRA | 476,2 | 15 | 10 | 23 |
| 5 | BORRA | 476,2 | 12 | 10 | 23 |
| 5 | BORRA | 476,2 | 16 | 10 | 23 |
| 5 | BORRA | 476,2 | 13 | 10 | 23 |

continua ANEXO A5 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para *rescheduling* com população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | | |
|---|-------|-------|----|----|----|
| 5 | BORRA | 476,2 | 6 | 10 | 23 |
| 5 | PP | 450,0 | 5 | 10 | 24 |
| 5 | PP | 450,0 | 15 | 10 | 25 |
| 5 | BORRA | 476,2 | 8 | 10 | 23 |
| 6 | BORRA | 474,8 | 25 | 10 | 25 |
| 6 | BORRA | 474,8 | 25 | | |
| 6 | BORRA | 474,8 | 27 | 10 | 23 |
| 6 | PP | 450,0 | 25 | 10 | 24 |
| 6 | BORRA | 474,8 | 9 | 10 | 23 |
| 6 | BORRA | 474,8 | 9 | 10 | 23 |
| 6 | PP | 450,0 | 8 | 10 | 24 |
| 6 | PP | 450,0 | 11 | 10 | 25 |
| 6 | PP | 450,0 | 8 | 10 | 25 |
| 6 | BORRA | 474,8 | 29 | 10 | 23 |
| 7 | BORRA | 501,1 | 5 | 10 | 27 |
| 7 | PP | 462,6 | 9 | 10 | 25 |
| 7 | BORRA | 501,1 | 10 | 10 | 25 |
| 7 | PP | 462,6 | 32 | 10 | 25 |
| 7 | PP | 462,6 | 14 | 10 | 26 |
| 7 | BORRA | 501,1 | 5 | 10 | 25 |
| 7 | BORRA | 501,1 | 9 | 10 | 25 |
| 7 | PP | 462,6 | 33 | 10 | 25 |
| 7 | BORRA | 501,1 | 5 | 10 | 25 |

continua ANEXO A5 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para *rescheduling* com população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | | |
|----|-------|-------|----|----|----|
| 7 | BORRA | 501,1 | 5 | 10 | 25 |
| 8 | PP | 450,6 | 29 | 10 | 27 |
| 8 | BORRA | 558,1 | 20 | 10 | 29 |
| 8 | PP | 450,6 | 6 | 10 | 24 |
| 8 | PP | 450,6 | 8 | 10 | 25 |
| 8 | PP | 450,6 | 10 | 10 | 25 |
| 8 | PP | 450,6 | 19 | 10 | 25 |
| 8 | BORRA | 558,1 | 6 | 10 | 29 |
| 8 | PP | 450,6 | 5 | 10 | 24 |
| 8 | BORRA | 558,1 | 5 | 10 | 29 |
| 8 | BORRA | 558,1 | 6 | 10 | 29 |
| 9 | BORRA | 512,6 | 11 | 10 | 28 |
| 9 | PP | 515,0 | 15 | 10 | 31 |
| 9 | BORRA | 512,6 | 13 | 10 | 25 |
| 9 | PP | 515,0 | 6 | 10 | 31 |
| 9 | BORRA | 512,6 | 21 | 10 | 25 |
| 9 | BORRA | 512,6 | 7 | 10 | 25 |
| 9 | BORRA | 512,6 | 25 | 10 | 25 |
| 9 | BORRA | 512,6 | 36 | 10 | 25 |
| 9 | PP | 515,0 | 8 | 10 | 31 |
| 10 | PP | 483,4 | 8 | 10 | 30 |
| 10 | BORRA | 510,9 | 16 | 10 | 25 |
| 10 | BORRA | 510,9 | 25 | 10 | 25 |

continua ANEXO A5 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para *rescheduling* com população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | | |
|----|-------|-------|----|----|----|
| 10 | BORRA | 510,9 | 10 | 10 | 25 |
| 10 | BORRA | 510,9 | 7 | 10 | 25 |
| 10 | PP | 483,4 | 14 | 10 | 28 |
| 10 | BORRA | 510,9 | 5 | 10 | 25 |
| 10 | BORRA | 510,9 | 22 | 10 | 25 |
| 10 | BORRA | 510,9 | 5 | 10 | 25 |
| 10 | BORRA | 510,9 | 7 | 10 | 25 |
| 11 | BORRA | 522,6 | 12 | 10 | 29 |
| 11 | PP | 478,2 | 26 | 10 | 27 |
| 11 | PP | 478,2 | 36 | 10 | 27 |
| 11 | PP | 478,2 | 37 | 10 | 27 |
| 11 | BORRA | 522,6 | 8 | 10 | 26 |
| 11 | PP | 478,2 | 9 | 10 | 27 |
| 11 | BORRA | 522,6 | 8 | 10 | 26 |
| 11 | BORRA | 522,6 | 5 | 10 | 26 |
| 11 | PP | 478,2 | 5 | 10 | 27 |
| 12 | BORRA | 518,7 | 8 | 10 | 28 |
| 12 | PP | 495,0 | 9 | 10 | 29 |
| 12 | PP | 495,0 | 36 | 10 | 29 |
| 12 | BORRA | 518,7 | 7 | 10 | 26 |
| 12 | BORRA | 518,7 | 20 | 10 | 26 |
| 12 | BORRA | 518,7 | 7 | 10 | 26 |
| 12 | BORRA | 518,7 | 6 | 10 | 26 |

continua ANEXO A5 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para *rescheduling* com população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | | |
|----|-------|-------|----|----|----|
| 12 | BORRA | 518,7 | 5 | 10 | 26 |
| 12 | BORRA | 518,7 | 5 | 10 | 26 |
| 12 | PP | 495,0 | 5 | 10 | 29 |
| 13 | BORRA | 609,5 | 33 | 10 | 36 |
| 13 | BORRA | 609,5 | 6 | 10 | 33 |
| 13 | PP | 467,1 | 14 | 10 | 25 |
| 13 | PP | 467,1 | 25 | 10 | 26 |
| 13 | BORRA | 609,5 | 6 | 10 | 34 |
| 13 | BORRA | 609,5 | 9 | 10 | 33 |
| 13 | BORRA | 609,5 | 5 | 10 | 33 |
| 13 | BORRA | 609,5 | 5 | 10 | 33 |
| 13 | PP | 467,1 | 6 | 10 | 25 |
| 14 | PP | 484,2 | 27 | 10 | 30 |
| 14 | PP | 484,2 | 15 | 10 | 28 |
| 14 | PP | 484,2 | 7 | 10 | 28 |
| 14 | PP | 484,2 | 16 | 10 | 28 |
| 14 | PP | 484,2 | 5 | 10 | 28 |
| 14 | PP | 484,2 | 9 | 10 | 28 |
| 14 | PP | 484,2 | 5 | 10 | 28 |
| 14 | BORRA | 481,6 | 5 | 10 | 23 |
| 14 | BORRA | 481,6 | 5 | 10 | 23 |
| 14 | PP | 484,2 | 9 | 10 | 28 |
| 15 | PP | 590,5 | 14 | 10 | 44 |

continua ANEXO A5 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para *rescheduling* com população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | | |
|----|-------|-------|----|----|----|
| 15 | BORRA | 461,1 | 7 | 10 | 21 |
| 15 | BORRA | 461,1 | 6 | 10 | 22 |
| 15 | BORRA | 461,1 | 13 | 10 | 22 |
| 15 | BORRA | 461,1 | 5 | 10 | 22 |
| 15 | BORRA | 461,1 | 5 | 10 | 22 |
| 15 | BORRA | 461,1 | 14 | 10 | 22 |
| 15 | PP | 590,5 | 5 | 10 | 41 |
| 15 | BORRA | 461,1 | 10 | 10 | 21 |
| 15 | BORRA | 461,1 | 5 | 10 | 22 |
| 15 | BORRA | 461,1 | 5 | 10 | 22 |
| 16 | BORRA | 540,3 | 5 | 10 | 30 |
| 16 | BORRA | 540,3 | 5 | 10 | 27 |
| 16 | PP | 450,0 | 5 | 10 | 24 |
| 16 | BORRA | 540,3 | 6 | 10 | 28 |
| 16 | BORRA | 540,3 | 5 | 10 | 27 |
| 16 | BORRA | 540,3 | 6 | 10 | 27 |
| 16 | BORRA | 540,3 | 5 | 10 | 27 |
| 16 | BORRA | 540,3 | 5 | 10 | 27 |
| 16 | BORRA | 540,3 | 14 | 10 | 27 |
| 16 | BORRA | 540,3 | 5 | 10 | 27 |
| 16 | BORRA | 540,3 | 5 | 10 | 27 |
| 17 | BORRA | 534,1 | 6 | 10 | 30 |
| 17 | BORRA | 534,1 | 30 | 10 | 27 |

continua ANEXO A5 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para *rescheduling* com população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | | |
|----|-------|-------|----|----|----|
| 17 | BORRA | 534,1 | 31 | 10 | 27 |
| 17 | BORRA | 534,1 | 5 | 10 | 27 |
| 17 | BORRA | 534,1 | 7 | 10 | 27 |
| 17 | BORRA | 534,1 | 5 | 10 | 27 |
| 17 | BORRA | 534,1 | 7 | 10 | 27 |
| 17 | BORRA | 534,1 | 5 | 10 | 27 |
| 17 | BORRA | 534,1 | 5 | 10 | 27 |
| 17 | BORRA | 534,1 | 6 | 10 | 27 |
| 18 | BORRA | 505,7 | 14 | 10 | 27 |
| 18 | BORRA | 505,7 | 13 | 10 | 25 |
| 18 | BORRA | 505,7 | 5 | 10 | 25 |
| 18 | BORRA | 505,7 | 5 | 10 | 25 |
| 18 | BORRA | 505,7 | 22 | 10 | 25 |
| 18 | BORRA | 505,7 | 5 | 10 | 25 |
| 18 | BORRA | 505,7 | 5 | 10 | 25 |
| 18 | BORRA | 505,7 | 6 | 10 | 25 |
| 18 | BORRA | 505,7 | 5 | 10 | 25 |
| 18 | BORRA | 505,7 | 5 | 10 | 25 |
| 18 | BORRA | 505,7 | 5 | 10 | 25 |
| 18 | BORRA | 505,7 | 5 | 10 | 25 |
| 19 | BORRA | 539,5 | 5 | 10 | 30 |
| 19 | BORRA | 539,5 | 8 | 10 | 27 |
| 19 | BORRA | 539,5 | 5 | 10 | 27 |
| 19 | BORRA | 539,5 | 8 | 10 | 27 |

continua ANEXO A5 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para *rescheduling* com população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | | |
|----|-------|-------|----|----|----|
| 19 | BORRA | 539,5 | 9 | 10 | 27 |
| 19 | BORRA | 539,5 | 5 | 10 | 27 |
| 19 | BORRA | 539,5 | 5 | 10 | 27 |
| 19 | BORRA | 539,5 | 6 | 10 | 27 |
| 19 | BORRA | 539,5 | 5 | 10 | 27 |
| 19 | BORRA | 539,5 | 5 | 10 | 27 |
| 19 | BORRA | 539,5 | 5 | 10 | 27 |
| 20 | BORRA | 545,7 | 6 | 10 | 31 |
| 20 | BORRA | 545,7 | 12 | 10 | 28 |
| 20 | BORRA | 545,7 | 15 | 10 | 28 |
| 20 | BORRA | 545,7 | 6 | 10 | 28 |
| 20 | BORRA | 545,7 | 5 | 10 | 28 |
| 20 | BORRA | 545,7 | 5 | 10 | 28 |
| 20 | BORRA | 545,7 | 6 | 10 | 28 |
| 20 | BORRA | 545,7 | 5 | 10 | 28 |
| 20 | BORRA | 545,7 | 11 | 10 | 28 |
| 20 | BORRA | 545,7 | 17 | 10 | 28 |
| 21 | BORRA | 583,3 | 12 | 10 | 34 |
| 21 | BORRA | 583,3 | 6 | 10 | 31 |
| 21 | BORRA | 583,3 | 5 | 10 | 31 |
| 21 | BORRA | 583,3 | 10 | 10 | 31 |
| 21 | BORRA | 583,3 | 8 | 10 | 31 |
| 21 | BORRA | 583,3 | 5 | 10 | 31 |

continua ANEXO A5 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para *rescheduling* com população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | | |
|----|-------|-------|----|----|----|
| 21 | BORRA | 583,3 | 5 | 10 | 31 |
| 21 | BORRA | 583,3 | 6 | 10 | 31 |
| 21 | BORRA | 583,3 | 5 | 10 | 31 |
| 21 | BORRA | 583,3 | 6 | 10 | 31 |
| 22 | BORRA | 578,2 | 7 | 10 | 33 |
| 22 | BORRA | 578,2 | 12 | 10 | 30 |
| 22 | BORRA | 578,2 | 12 | 10 | 30 |
| 22 | BORRA | 578,2 | 6 | 10 | 30 |
| 22 | BORRA | 578,2 | 5 | 10 | 30 |
| 22 | BORRA | 578,2 | 5 | 10 | 30 |
| 22 | BORRA | 578,2 | 5 | 10 | 30 |
| 22 | BORRA | 578,2 | 5 | 10 | 30 |
| 22 | BORRA | 578,2 | 6 | 10 | 30 |
| 22 | BORRA | 578,2 | 5 | 10 | 30 |
| 23 | BORRA | 497,7 | 6 | 10 | 27 |
| 23 | BORRA | 497,7 | 18 | 10 | 24 |
| 23 | BORRA | 497,7 | 8 | 10 | 24 |
| 23 | BORRA | 497,7 | 9 | 10 | 24 |
| 23 | BORRA | 497,7 | 6 | 10 | 24 |
| 23 | BORRA | 497,7 | 10 | 10 | 24 |
| 23 | BORRA | 497,7 | 22 | 10 | 24 |
| 23 | BORRA | 497,7 | 5 | 10 | 24 |
| 23 | BORRA | 497,7 | 5 | 10 | 24 |

continua ANEXO A5 Sequenciamento de Produção e Condições Operacionais para *rescheduling* com população de 100 indivíduos e 2000 gerações

| | | | | | |
|----|-------|-------|----|----|----|
| 23 | BORRA | 497,7 | 6 | 10 | 24 |
| 23 | BORRA | 497,7 | 5 | 10 | 24 |
| 24 | BORRA | 523,3 | 5 | 10 | 29 |
| 24 | BORRA | 523,3 | 5 | 10 | 26 |
| 24 | BORRA | 523,3 | 7 | 10 | 26 |
| 24 | BORRA | 523,3 | 8 | 10 | 26 |
| 24 | BORRA | 523,3 | 8 | 10 | 26 |
| 24 | BORRA | 523,3 | 5 | 10 | 26 |
| 24 | BORRA | 523,3 | 7 | 10 | 26 |
| 24 | BORRA | 523,3 | 6 | 10 | 26 |
| 24 | BORRA | 523,3 | 5 | 10 | 26 |
| 24 | BORRA | 523,3 | 16 | 10 | 26 |
| 24 | BORRA | 523,3 | 6 | 10 | 26 |
| 25 | BORRA | 560,9 | 6 | 10 | 33 |
| 25 | BORRA | 560,9 | 16 | 10 | 29 |
| 25 | BORRA | 560,9 | 5 | 10 | 29 |
| 25 | BORRA | 560,9 | 5 | 10 | 29 |
| 25 | BORRA | 560,9 | 7 | 10 | 29 |
| 25 | BORRA | 560,9 | 12 | 10 | 29 |
| 25 | BORRA | 560,9 | 7 | 10 | 29 |
| 25 | BORRA | 560,9 | 5 | 10 | 29 |
| 25 | BORRA | 560,9 | 13 | 10 | 29 |
| 25 | BORRA | 560,9 | 7 | 10 | 29 |
