

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



Otimização para o posicionamento dos equipamentos do circuito de massa na fabricação de papel Tissue

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

Autora: Daniela Medeiros Devienne Drummond

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Guirardello

Campinas - SP

Agosto/ 2004

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu marido Jair José por sempre ter me apoiado e incentivado nos desafios de minha vida e ao meu filho Thiago que apesar de sua pouca idade pode compreender as ausências da mãe. Ao meu pai Roberto, minha mãe Maria Isabel e meu irmão Roberto.

AGRADECIMENTOS

A DEUS pela vida.

Ao meu marido e filho pelo amor, incentivo e paciência.

Aos meus pais e irmão pelo carinho.

Ao Professor Reginaldo Guirardello pela paciência e orientação.

AO CNPQ (Centro Nacional de Pesquisa) pela bolsa de Mestrado.

A amiga Consuelo por sempre ter estado ao meu lado, principalmente nas horas mais difíceis.

**“Pois o Senhor é quem dá sabedoria; de sua boca procedem o
conhecimento e o discernimento”**

Provérbios 2-6

RESUMO

A principal área de ação de um layout industrial é sem nenhuma dúvida a empresa, definindo e integrando os elementos produtivos. A questão está relacionada com o local e arranjo de departamentos, células ou máquinas em uma planta ou chão de escritório. Por causa dos aspectos geométricos e combinatoriais do problema, trata-se de uma questão cuja solução pode atingir altos níveis de complexidade, de acordo com o incremento de variáveis do sistema. Além disso, o layout industrial engloba fatores quantitativos e qualitativos que associados, podem tornar-se difíceis de modelar e analisar.

A otimização é o processo de encontrar a melhor solução (ou solução ótima) de um conjunto de soluções para um problema. Existe um conjunto particular de problemas nos quais é decisiva a aplicação de um procedimento de otimização. São problemas complexos, muitas vezes de difícil solução, e que envolvem significativas reduções de custos, melhorias de tempos de processos, ou uma melhor alocação de recursos em atividades. Os modelos matemáticos podem ser usados para se obter o layout de processo mais econômico, sujeito a restrições que possibilitem a operação, manutenção e segurança. Portanto, todos os modelos objetivam minimizar o custo total, desde que satisfaçam as restrições de espaço livre ao redor dos componentes.

Essa categoria abrange a fabricação de papéis higiênicos, que respondem por 80% da produção, as toalhas (16%) e guardanapos/lenços (4%), além da chamada "linha institucional" para atendimento a consumidores maiores, como redes de fast-food, hospitais, escritórios, indústrias, etc. O Brasil contribui com 3,1% da produção mundial e é o 8º produtor mundial de papel sanitário.

Este trabalho tem como objetivo a utilização da modelagem matemática para otimização dos equipamentos na fabricação papel de papel Tissue. O modelo utilizado foi baseado em (GUIRARDELLO, 1993) e a programação foi feita em MILP, o software utilizado para a modelagem foi o GAMS (General Algebraic Modeling System), o qual é designado à construção e solução de grandes e complexos modelos de programação matemática, oferecendo recursos poderosos para programadores e sendo mais compreensível para usuários de modelos de outras disciplinas.

Palavras Chave: Otimização, Papel Tissue, Layout, MILP, GAMS.

ABSTRACT

The main area of an industrial layout is without no doubt the company, defining and integrating the productive elements. The main question is related to the right the place and arrangement of departments, cells or machines in a plant or clerical soil. Because of the geometrical and combinatorid aspects of the problem, it is a kind of question that solution can reach high levels of complexity, in accordance with the incremented in variables of the system. Moreover, the industrial layout embodies quantitative and qualitative factors that in association, can become difficult to analyze and model . The optimization is the process to find the best solution (or excellent solution) amon a set of solutions for a problem. The application of a optimization procedure exists . There is a particular set problems in which is decisive.

They are complex problems, many times of difficult solution, and that they involve significant reductions of costs, improvements of times of processes, or one better allocation of resources in atividades.Os mathematical models they can be used to get the layout of more economic process, subject to restrictions that make possible the operation, maintenance and security. Therefore, all the models objectify to minimize the total cost, since that they around satisfy the restrictions of free space of the components.

This category encloses the toilet papers, that answer for 80% of the production, the towels (16%) and nippes (4%), beyond the call "institucional line" for attendance the consumers biggest, as nets of fast-food, hospitals, offices, industries, etc. Brazil contributes with 3.1% of the world-wide production and is 8° producing world-wide of tissue paper.

This work has as objective the use of the mathematical modeling for optimizing the position equipment in the manufacture paper of Tissue paper. The model used was based of (GUIRARDELLO, 1993) and the programming was made in Entire Mixing MILP, the software used for the modeling was the GAMS (General Algebraic Modeling System), which is assigned to the great construction and solution of and complex models of mathematical programming, offering powerful resources for programmers and being more understandable for users of models of others you discipline.

Keywords: Optimization, Tissue Paper , Layout, MILP, GAMS.

SUMÁRIO

RESUMO	V
ABSTRACT	VI
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XI
NOMENCLATURA	XIV
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1.CONTEXTO	1
1.2. OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
CAPÍTULO 2	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. DEFINIÇÃO DE LAYOUT	4
2.1.1. Objetivos do Layout	5
2.1.2 Quando fazer um estudo de Layout	6
2.1.3. Resultados de um bom Layout	7
2.2.CLASSIFICAÇÃO DO LAYOUT	10
2.2.1. Tipos de Layout	10
2.2.2. Vantagens e desvantagens dos diversos tipos de Layout	12
2.2.3. Escolha do tipo de Layout	13
2. 3. MODELOS MATEMÁTICOS PARA LAYOUT DE PROCESSOS QUÍMICOS	14
2.4. O PROBLEMA DE ARRANJO FÍSICO	15
2.5.ALGORITMOS PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE ARRANJO FÍSICO	16
CAPÍTULO 3	19
INDÚSTRIA DO PAPEL	19
3.1.HISTÓRIA DO PAPEL	19
3.1.1.Século VII A XII - A entrada na Europa - A rota do papel	22
3.1.2. Melhoramentos surgidos no século X	23
3.1.3.A fabricação do papel – Método antigo	23
3.1.3.1.Os moinhos de martelo	24
3.1.4.Os séculos XVII e XIX:	24
3.1.5.Evoluções marcantes	24

3.1.6.A fabricação do papel – Método atual	25
3.1.7.Partes de uma máquina de fabricação contínua de papel	27
3.7.1.1.Seção de Formação	27
3.7.1.2.Seção de prensagem úmida da folha de papel	28
3.7.1.3.Seção de secagem	28
3.7.1.4.Enrolamento ou Corte	29
3.7.1.5.Características do produto final	30
3.2.ESQUEMA GERAL DE FUNCIONAMENTO DE UMA FABRICAÇÃO DO PAPEL	30
3.2.1.Preparação de Massa	30
3.2.1.1.Desagregação da Celulose	30
3.2.1.2.Refinação	31
3.2.1.3.Preparação da Receita	31
3.2.1.4.Depuração	31
3.2.2.Máquina de Papel	32
3.2.2.1.Caixa de Entrada	32
3.2.2.2.Mesa Plana	33
3.2.2.3.Prensas	33
3.2.2.4.Secagem	34
3.2.2.5.Calandra e Enroladeira	35
3.3.PANORAMA ATUAL	35
3.3.1.Papéis para fins sanitários (Tissue)	36
3.4.TIPOS DE PAPÉIS	38

CAPÍTULO 4 **40**

MODELO UTILIZADO E MÉTODO DE RESOLUÇÃO	40
4.1.IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO ORIGINAL EM GAMS	40
4.2. OTIMIZAÇÃO	47
4.3.MODELAGEM E SIMULAÇÃO	49
4.4.MODELOS MATEMÁTICOS DE OTIMIZAÇÃO	50
4.4.1.Formulação do problema	51
4.5.ALGORITMO	55
4.6.BRANCH – AND –BOUND	56
4.6.1. Conceitos	56
4.6.2 Como Branch and Bound funciona	61
4.6.3. Upper e Lower Bounds	62
4.6.4. Vantagens e Desvantagens	62
4.7. METODOLOGIA DA UTILIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA	63
4.8. SOFTWARE GAMS	64

CAPÍTULO 5 **71**

OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DOS COMPONENTES NA FABRICAÇÃO DE PAPEL TISSUE	71
5.1. PLANTA DE FABRICAÇÃO DE PAPEL TISSUE	71
5.2.DADOS PARA O CASO DE ESTUDO	73
5.2.1. Distâncias mínimas de segurança	75

5.2.2. Posicionamento dos Bocais	78
5.2.3 Custos de Tubulação	79

CAPÍTULO 6 **81**

RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
6.1. TESTE DE PERFORMANCE DO CPLEX 7.5	81
6.2. OTIMIZAÇÃO DA PLANTA DE FABRICAÇÃO DE PAPEL TISSUE	83
6.2.1. Estudos preliminares	83
6.2.2. Estudo de Caso 01	83
6.2.3. Estudo de Caso 02	90
6.2.4. Estudo de Caso 03	97
6.3. VISTAS DOS ESTUDOS DE CASO 01, 02 E 03.	104
6.4. CONCLUSÃO	109

CAPÍTULO 7 **110**

CONCLUSÕES	110
7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	110

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **112**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS NA INTERNET **116**

ANEXOS **117**

ANEXO 1 **118**

IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PARA UNIDADE DE FABRICAÇÃO DE PAPEL TISSUE EM GAMS/CPLEX 7.5	118
--	-----

ANEXO 2 **145**

UNIDADE PETROQUÍMICA	145
----------------------	-----

ANEXO 3 **153**

UNIDADE DE POLIMERIZAÇÃO	153
--------------------------	-----

ANEXO 4 **158**

UNIDADE DE RECUPERAÇÃO DE MERCÚRIO A PARTIR DE EFLUENTES ELETROLÍTICOS	158
--	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 - As oito rotações possíveis no plano x-y _____	51
Figura 4.2 - Níveis empregados na otimização da área industrial _____	53
Figura 4.3 - Fluxograma do Branch-and-Bound. _____	58
Figura 5.1 - Unidade de fabricação de papel Tissue com quinze componentes principais. _____	72
Figura 6.2 - Vista Superior – Estudo de Caso 02 _____	105
Figura 6.3 - Vista Superior – Estudo de Caso 03 _____	105
Figura 6.4 - Vista Isométrica SE – Estudo de Caso 01 _____	106
Figura 6.5 - Vista Isométrica SE – Estudo de Caso 02 _____	106
Figura 6.6 - Vista Isométrica SE – Estudo de Caso 03 _____	106
Figura 6.7 - Vista Lateral – Estudo de Caso 01 _____	107
Figura 6.8 - Vista Lateral – Estudo de Caso 02 _____	107
Figura 6.9 - Vista Lateral – Estudo de Caso 03 _____	107
Figura 6.10 - Vista Lateral – Estudo de Caso 03 _____	108
Figura 6.11 - Vista Lateral – Estudo de Caso 03 _____	108
Figura 6.12 - Vista Lateral – Estudo de Caso 03 _____	108
Figura A.2.1 - Unidade petroquímica com nove componentes principais. _____	145
Figura A.3.1 - Planta de polimerização com treze componentes principais. _____	153
Figura A.4.1 - Planta de recuperação de mercúrio a partir de efluentes eletrolíticos. _____	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais características do layout linear e do funcional _____	11
Tabela 3.1 - Evolução da produção e destino _____	36
Tabela 3.2 - Classificação do papel Tissue _____	37
Tabela 3.3 – Tipos de Papéis _____	38
Tabela 5.1 - Os quinze principais equipamentos para fabricação de papel Tissue. _____	73
Tabela 5.2 - Dimensões dos equipamentos na fabricação de papel Tissue. _____	74
Tabela 5.4 - Distâncias mínimas verticais de segurança entre os equipamentos na fabricação de papel Tissue. _____	77
A tabela 5.5 mostra a orientação dos bocais dos equipamentos, em relação à FX, FY e FZ. _____	78
Tabela 5.5 - Posicionamento dos bocais dos equipamentos. _____	78
Tabela 5.6 - Dados das tubulações em relação ao diâmetro necessário para fluxo de massa. _____	79
Tabela 6.1 - Resultados comparativos da Planta Petroquímica. _____	82
Tabela 6.2 - Resultados comparativos da Planta de Polimerização. _____	82
Tabela 6.3 - Resultados comparativos da Planta de Recuperação de Mercúrio _____	82
Tabela 6.4 - Resultados obtidos para o custo para Estudo de Caso 01 para a estratégia best bound e depth first. _____	84
Tabela 6.5 - Resultados obtidos para Estudo de Caso 01 para a estratégia best bound e depth first _____	84
Tabela 6.6 - Custo dos suportes para cada componente da fabricação de papel Tissue – Estudo de Caso 01 estratégia best bound e depth first. _____	85
Tabela 6.7 - Comprimento dos tubos, em metros. _____	86
Tabela 6.8 - Custo de tubulação para o Estudo de Caso 01 _____	87
Tabela 6.9 - Posições do centro dos componentes. _____	88
Tabela 6.10 - Número de equações e variáveis utilizadas. _____	89
Tabela 6.11 - Orientações dos componentes em X para a posição relativa entre os componentes i e j _____	89
Tabela 6.12 - Orientações dos componentes em Y para a posição relativa entre os componentes i e j _____	89
Tabela 6.13 - Resultados obtidos para o custo para Estudo de Caso 02 para a estratégia best bound e depth first. _____	90
Tabela 6.14 - Resultados obtidos para Estudo de Caso 02 para a estratégia best bound e depth first. _____	91
Tabela 6.16 - Comprimento dos tubos, em metros. _____	93
Tabela 6.17 - Custo de tubulação para o Estudo de Caso 02 _____	94
Tabela 6.18 - Posições do centro dos componentes. _____	95
Tabela 6.19 - Número de equações e variáveis utilizadas. _____	96
Tabela 6.20 - Orientações dos componentes em X para a posição relativa entre os componentes i e j _____	96
Tabela 6.21 - Orientações dos componentes em Y para a posição relativa entre os componentes i e j _____	96
Tabela 6.22 - Orientações dos componentes em Z para a posição relativa entre os componentes i e j _____	97

Tabela 6.23 - Resultados obtidos para o custo para estudo de caso 03 para a estratégia best bound e depth first. _____	97
Tabela 6.24 - Resultados obtidos para estudo de caso 03 para a estratégia best bound e depth first. _____	98
Tabela 6.25 - Custo dos suportes para cada componente da fabricação de papel Tissue – Estudo de Caso 03 estratégia best bound e depth first. _____	99
Tabela 6.26 - Comprimento dos tubos, em metros. _____	100
Tabela 6.27 - Custo de tubulação para o Estudo de Caso 03 _____	101
Tabela 6.28 - Posições do centro dos componentes. _____	102
Tabela 6.29 - Número de equações e variáveis utilizadas. _____	103
Tabela 6.30 - Orientações dos componentes em X para a posição relativa entre os componentes i e j _____	103
Tabela 6.31 - Orientações dos componentes em Y para a posição relativa entre os componentes i e j _____	103
Tabela 6.32 - Orientações dos componentes em Z para a posição relativa entre os componentes i e j _____	104
Tabela A.2.1 - Dimensões e áreas dos componentes para a unidade petroquímica. ____	146
Tabela A.2.2 - Distâncias mínimas entre os componentes para a unidade petroquímica. _____	147
Tabela A.2.3 - Posicionamento dos bocais para a unidade petroquímica. _____	147
Tabela A.2.4 - Dados para os tubos na otimização do layout da unidade petroquímica. _	148
Tabela A.2.5 - Custo dos suportes para cada componente da unidade petroquímica. ____	149
Tabela A.2.6 - Comprimento dos tubos, em metros, obtidos pelo GAMS, para a unidade petroquímica. _____	150
Tabela A.2.7 - Orientações dos componentes obtidas para a unidade petroquímica, conforme a estratégia depth first. _____	150
Tabela A.2.8 - Orientações dos componentes obtidas para a unidade petroquímica, conforme a estratégia best bound. _____	151
Tabela A.2.9 - Posições do centro dos componentes obtidas para a unidade petroquímica. _____	151
Tabela A.2.10 - Posições relativas entre os componentes obtidos para a unidade petroquímica, conforme a estratégia best bound. _____	152
Tabela A.2.11 - Número de equações e variáveis _____	152
Tabela A.3.1 - Dimensões e áreas dos componentes para a unidade de polimerização. _	154
Tabela A.3.2 - Dados para os tubos na otimização do layout da planta de polimerização. _____	154
Tabela A.3.3 - Distâncias mínimas entre os componentes para a unidade de polimerização. _____	155
Tabela A.3.4 - Posicionamento dos bocais para a unidade de polimerização. _____	156
Tabela A.3.5 - Custos de terreno, suportes e tubulação para a planta de polimerização. _	157
Tabela A.3.6 - Orientações dos componentes obtidas para a planta de polimerização, conforme a estratégia depth first. _____	157
Tabela A.4.1 - Dimensões estimadas dos componentes para a planta de recuperação de mercúrio. _____	159
Tabela A.4.2 - Dados para os tubos na otimização do layout da planta de recuperação de mercúrio. _____	160
Tabela A.4.3 - Posicionamento dos bocais para a planta de recuperação de mercúrio. ____	161
Tabela A.4.4 - Distâncias mínimas entre os componentes para a planta de recuperação de mercúrio. _____	162
Tabela A.4.5 - Custos de terreno, suportes e tubulação para a planta de recuperação de mercúrio. _____	163

Tabela A.4.6 - Orientações dos componentes obtidas para a planta de recuperação de mercúrio. _____	163
Tabela A.4.7 - Posições do centro dos componentes obtidas para a planta de recuperação de mercúrio. _____	164
Tabela A.4.8 - Posições relativas entre os componentes obtidos para a planta de recuperação de mercúrio, para qualquer estratégia e modelo. _____	164
Tabela A.4.9 - O número de equações e variáveis usadas em cada modelo, para a planta de recuperação de mercúrio. _____	165

NOMENCLATURA

A_i, B_i, C_i	dimensões para o componente i
C^{per}	custo por unidade de comprimento (de perímetro)
C_k^p	custo por unidade de comprimento para o tubo k
C_{ik}^{sa}, C_{ik}^{sb}	fatores de custo unitário para o suporte do componente i
C_i^s	custo dos suportes para o componente i
$d_{ij}^x, d_{ij}^y, d_{ij}^z$	distância de Manhattan entre os centros dos componentes i e j nas direções x , y e z
D_{ij}^h	distância mínima horizontal entre os componentes i e j
D_{ij}^v	distância mínima vertical entre os componentes i e j
E_i^l	elevação mínima vertical do componente i
$F_{ji}^x, F_{ji}^y, F_{ji}^z$	posições relativas dos bocais j na superfície do componente i
F_p^x, F_p^y, F_p^z	posições relativas dos bocais relacionadas ao terminal $k_s(k)$
F_q^x, F_q^y, F_q^z	posições relativas dos bocais relacionadas ao terminal $k_t(k)$
$k_s(k)$	terminal dos bocais do tubo k (ponto de partida)
$k_t(k)$	terminal dos bocais do tubo k (ponto de chegada)
$l_k^{x+}, l_k^{x-}, l_k^{y+}, l_k^{y-}, l_k^{z+}, l_k^{z-}$	comprimentos dos tubos k usando a distância de Manhattan nas direções x , y e z
M	um número grande
N_{cp}	número de componentes
N_{pi}	número de tubos

N_{nz}	número de bocais
N_{zi}	número de bocais do componente i
x, y, z	dimensões do layout da planta
x_i, y_i, z_i	posições do centro do componente i
x_p^n, y_p^n, z_p^n	posição do bocal p
w_{il}	variável inteira para a rotação do componente i
$w_{ij}^x, w_{ij}^y, w_{ij}^z$	variáveis inteiras para as posições relativas entre os componentes i e j.

SIGLAS

B&B	Algoritmo Branch and Bound
GAMS	Código comercial de otimização (General Algebraic Modeling System)
MILP	Programação mista, inteira e linear
MIP	Programação mista e inteira
HIG	Higiênico
FSB.Qualidade	Folha Simples de Baixa Qualidade
FSA.Qualidade	Folha Simples de Alta Qualidade

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1.Contexto

A indústria química passou por mudanças significativas nos últimos 15 anos:

- elevação dos custos da energia e de matérias-primas;
- legislação ambiental mais rigorosa;
- intensa competição mundial.

Tornou-se necessário adaptar os procedimentos de projeto e as condições operacionais das plantas, para reduzir custos e satisfazer as restrições. Hoje em dia, está consolidada a idéia de que num futuro próximo, a ênfase estará no aumento de eficiência e lucratividade, ao invés da expansão das unidades.

Uma das mais importantes ferramentas de engenharia que pode ser empregada nessas atividades é a otimização. Com o aumento da capacidade dos computadores, a dimensão e a complexidade dos problemas que podem ser resolvidos por técnicas de otimização cresceram consideravelmente.

Os papéis Tissue representam cerca de 6% do volume de papéis de todos os tipos produzidos no mundo. Constitui-se de folhas ou rolos de baixa gramatura (entre 15 e 50 gramas por metro quadrado) e são empregadas nos domicílios, em instituições e empresas, para a absorção/remoção de umidade, matérias graxas e sujeira. A nomenclatura usual classifica os papéis Tissue em Papéis higiênicos (rolos usados nos toaletes, em folhas simples ou múltiplas); Toalhas (em folhas única ou dupla e rolos); Guardanapos (em folha simples ou múltiplas) e Lenços (em caixas ou dupla e rolos) (fonte: BNDES).

1.2. Objetivos e Organização do Trabalho

Este trabalho tem por objetivo obter a melhor localização dos equipamentos necessários no circuito de massa de uma fabricação de papel Tissue, utilizando um programa desenvolvido em GAMS.

Foi também objeto de estudo deste trabalho demonstrar o menor tempo computacional obtido utilizando este pacote comercial em relação aos casos de estudo realizados por (PISSINATTO, 2001), no qual foram utilizados três casos de estudo: unidade Petroquímica, unidade de Recuperação de Mercúrio, unidade de Polimerização.

Em relação à apresentação, este trabalho está organizado da seguinte forma:

Neste primeiro capítulo, é feita uma introdução situando a otimização e a indústria papelreira.

No segundo capítulo, é feita uma revisão bibliográfica sobre o estudo de Layout, mostrando os objetivos, os tipos e suas classificações. Também é apresentado neste capítulo os modelos matemáticos e algoritmos para resolução de arranjo físico.

No terceiro capítulo, é apresentado todo contexto da indústria papelreira, no qual é focado, a história do papel, apresentação dos equipamentos para fabricação de papel, bem como o panorama atual e os tipos de papéis.

No quarto capítulo é dedicado à demonstração do modelo utilizado, bem como a metodologia para resolução, onde é descrito a otimização, a modelagem e a simulação, bem como o algoritmo Branch and Bound, seu funcionamento, suas vantagens e desvantagens. Também é descrito o Software GAMS.

O quinto é dedicado à apresentação da otimização dos componentes na fabricação de papel Tissue, no qual são apresentados o fluxograma do circuito de massa e os principais equipamentos envolvidos.

No sexto capítulo, é apresentado os estudos de caso e os resultados obtidos.

No capítulo seguinte, é apresentada a conclusão do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

No anexo 1 é apresentado a implementação do modelo matemático para a fabricação de papel Tissue em GAMS. E no Anexo 2, 3 e 4 são apresentados os dados utilizados para avaliação da performance do solver CPLEX 7.5, os quais também foram utilizados por PISSINATO, 2001.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Definição de Layout

Segundo HOUNSELL (1999), a principal área de ação de um layout industrial é sem nenhuma dúvida a empresa, definindo e integrando os elementos produtivos. A questão está relacionada com o local e arranjo de departamentos, células ou máquinas em uma planta ou chão de escritório. Por causa dos aspectos geométricos e combinatórias do problema, trata-se de uma questão cuja solução pode atingir altos níveis de complexidade, de acordo com o incremento de variáveis do sistema. Além disso, o layout industrial engloba fatores quantitativos e qualitativos que associados, podem tornar-se difíceis de modelar e analisar.

Em geral, sempre é preferível fazer alguma simplificação de processo e análise, decompondo o problema em problemas menores e separados. Isto reduz o tamanho e complexidade do problema, permitindo um estudo mais completo de vários planos alternativos.

Podemos entender que o layout (plant layout – arranjo físico) é um estudo sistemático que procura uma combinação ótima das instalações industriais que concorrem para a produção, dentro de um espaço disponível. Layout é a maneira como os homens, máquinas e equipamentos estão dispostos em uma fábrica.

O problema do layout é a locação relativa mais econômica das várias áreas de produção na empresa. Em outras palavras, é a melhor utilização do espaço disponível que

resulte em um processamento mais efetivo, através da menor distância, no menor tempo possível.

O planejamento de um arranjo físico é recomendável a qualquer empresa, grande ou pequena. Com um bom arranjo físico, obtêm-se resultados surpreendentes na redução de custos de operação e no aumento de produtividade. Na implantação de uma nova fábrica, esse planejamento é imprescindível.

Naquelas já montadas, uma mudança nos processos de produção, a fabricação de novos produtos, a necessidade de redução de custos, a expansão de uma seção etc. necessitam de uma modificação no arranjo.

A limitação do espaço, a disponibilidade de tempo e a falta de pessoal qualificado podem dificultar a implantação de um layout ideal. No entanto o layout ideal serve como uma diretriz para qualquer modificação a ser feita. Parte-se então para um layout de adaptação.

O estudo do layout pode ser feito em:

- fábricas em geral;
- escritórios;
- lojas;
- supermercados, farmácias, etc;
- bancos;
- fazendas e outras atividades agropecuárias;
- construções residenciais e em muitas outras atividades em que haja movimento de material, mão-de-obra ou máquinas.

2.1.1. Objetivos do Layout

O melhor arranjo não é tão óbvio, exceto em casos triviais. Por meio da análise dos diversos fatores de produção e de um método de trabalho que inclua os princípios básicos do layout chega-se a um arranjo ótimo.

O objetivo do layout é a redução no custo e maior produtividade por meio de (MECKLENBURGH, 1985):

- Melhor utilização do espaço disponível;
- Redução da movimentação de materiais, produtos e pessoal;
- Fluxo mais racional (evitando paradas no processo de produção, etc.);
- Menor tempo de produção;
- Melhores condições de trabalho;
- Distâncias de segurança;
- Espaço para manutenção.

2.1.2 Quando fazer um estudo de Layout

Em várias situações torna-se necessário um estudo do layout (VIEIRA, 1983):

- Obsolescência das instalações;
- As instalações existentes tornam-se ineficientes devido a:
 1. novos produtos a serem fabricados;
 2. aquisição de máquinas exigindo ampliações de algumas seções;
 3. avanço na tecnologia, implicando em novos processos de fabricação;
 4. necessidade de maior espaço para estocagem, instalação de novas seções etc.
- Redução dos custos de produção;
- Variação na demanda - Isto pode exigir um aumento ou um decréscimo na produção;
- Ambiente de trabalho inadequado ruído, temperaturas anormais, pouca ventilação, má iluminação baixam o rendimento do trabalhador. Acidentes de trabalho podem ser evitados com um melhor layout;

- Excesso de estoques - É um indício de que o fluxo do produto não está bom;
- Manuseios excessivos - Provocam estragos no material de produção e atrasam a produção;
- Instalação de uma nova fábrica.

Um planejamento do layout evita futuras dores de cabeça. O layout deve ser feito tendo em vista a finalidade da fábrica, a quantidade a produzir, o tipo de trabalho, o espaço disponível, etc.

2.1.3. Resultados de um bom Layout

O resultado de um bom layout é um arranjo mais efetivo que ao mesmo tempo dê segurança e satisfação ao empregado. Este é obtido através do ambiente de trabalho apropriado, resultando em:

- Menores riscos para a saúde e segurança do operário;
- Maior satisfação e ânimo por parte do empregado;
- O trabalhador tem uma melhor compreensão do papel que desempenha;
- Melhor aparência na área de trabalho;
- Maior produção em um menor tempo;
- Redução dos manuseios e espaço percorrido;
- Economia de espaço;
- Menores demoras na produção;
- Melhor e mais fácil supervisão;
- Menores danos ao material e às suas qualidades;
- Ajustamento mais fácil a mudanças.

Um layout (arranjo físico) adequado é aquele que propicia a melhor utilização do espaço disponível, resultando em um processamento mais efetivo e seguro, através da menor distância, no menor tempo possível (VIEIRA, 1983).

A informação necessária para a elaboração de um layout de uma planta provém do fluxograma de processo, desenhos dos tanques com elevação e das conexões dos tubos, entre outras especificações dos equipamentos (KERN, 1977).

Há ainda a necessidade de conhecimentos nas áreas de engenharia mecânica e química, bem como considerações de desenho geométrico (KERN, 1978). Além disso, são necessários conhecimentos sobre o produto, o processo e a programação da produção (FRANCIS & WHITE, 1974).

O fluxo de materiais é um dos fatores mais importantes na determinação do tamanho, forma e arranjo geral de qualquer local de fabricação. Além de determinar o arranjo das máquinas. Enquanto o layout está relacionado com a análise, planejamento e projeto das instalações utilizadas na produção de bens e serviços; a movimentação de materiais está ligada à fase das operações que envolvem o movimento dos materiais usados no desempenho das atividades do empreendimento. Desta forma, o mesmo autor, considera que a movimentação de materiais é a parte principal de quase todo o trabalho de layout.

Um planejamento do layout evita futuras dores de cabeça. O layout deve ser feito tendo em vista a finalidade da fábrica, a quantidade a produzir, o tipo de trabalho, o espaço disponível, etc.

Portanto, o desenvolvimento adequado do layout de uma planta química faz parte de um processo mais genérico, isto é, do desenvolvimento do projeto de um processo químico. Este, por sua vez, envolve seis etapas principais (ULRICH, 1984):

1. Conceção e definição do problema:- devem-se conhecer as bases e hipóteses a serem aplicadas, a capacidade da planta e a distribuição de tempo. Nesta etapa, questionam-se os objetivos reais da planta, sua viabilidade econômica e sua flexibilidade para eventuais mudanças de processo.

2. Desenvolvimento do fluxograma de processo:- permite a familiarização com o processo, reduzindo a complexidade do problema e possibilitando identificar quais as informações ainda estão faltando.

3. Projeto dos equipamentos:- é necessário, pelo menos, o projeto parcial, pois o custo do equipamento é um elemento importante na economia do processo. Além disso, os vendedores ou fabricantes precisam de informações mais detalhadas, bem como do layout do processo, materiais de construção e espessura dos tanques, etc.

4. Análise econômica:- "Qual o retorno a ser esperado em relação ao dinheiro investido?" A resposta a essa pergunta envolve custos de processamento, matéria-prima, equipamentos, trabalho, além de fatores como inflação, taxas, etc. que influenciam na lucratividade do processo como um todo.

5. Otimização:- uma combinação de economia e engenharia. Busca-se o ótimo em relação a todos os fatores envolvidos no problema. (Aqui, pode-se incluir a otimização do posicionamento dos componentes do layout de plantas químicas, que é o objetivo deste trabalho.).

6. Apresentação de relatório:- é a apresentação organizada e clara de todo o esforço de trabalho realizado, garantindo o esclarecimento de dúvidas.

Em suma, pode-se dizer que o estudo do layout da planta inclui objetivos como (FRANCIS & WHITE, 1974):

1. minimizar o investimento em equipamento;
2. minimizar o tempo total de produção;
3. utilizar o espaço existente de maneira mais efetiva
4. propiciar facilidade, segurança e conforto aos empregados;

5. manter flexibilidade na disposição e operação;
6. minimizar o custo com o manuseio (movimentação em geral) dos materiais;
7. minimizar a variação de tipos de equipamentos para o manuseio dos materiais;
8. facilitar o processo de fabricação;
9. facilitar a estrutura organizacional.

2.2. Classificação do Layout

Costumam-se classificar, para fins didáticos, três tipos de layout. Na prática existe uma combinação dos diversos tipos. Os tipos de arranjo físico estão ligados à natureza do movimento existente na indústria (do produto, das máquinas ou do operário) (FRANCIS & WHITE, 1974; VIEIRA, 1983; JAMES & ALCORN, 1991).

2.2.1. Tipos de Layout

1. Layout por produto ou LINEAR
2. Layout por processo ou FUNCIONAL
3. Layout posicional ou FIXO

a) Layout por produto ou LINEAR

É o layout aplicado em fábricas de montagem. As máquinas são arranjadas de acordo com a seqüência de operações a se realizarem. O material move-se enquanto as máquinas permanecem fixas.

Exemplos de fábricas que usam preferencialmente o layout linear:

- fábrica de montagem de automóvel;
- refinarias de petróleo;

- maior parte das fábricas de produtos químicos

b) Layout por processo ou FUNCIONAL

Aqui as máquinas são agrupadas de modo a realizar operações análogas, em um mesmo local. O material move-se através de seções especializadas. Pode não haver uma seqüência de operações.

Exemplos de fábricas que usam preferencialmente o layout funcional:

- fábricas de sapato;
- têxteis ou de roupas

c) Layout posicional ou FIXO

É o layout aplicado quando o produto fica parado (é contraproducente mover o produto) enquanto operadores e máquinas se movimentam. Exemplos mais comuns são: fabricação de navios, construção civil, montagem de grandes máquinas, escultura etc. Como dissemos, geralmente existe uma combinação dos três tipos de layout. Abaixo descrevemos as principais características do layout linear e do funcional.

Tabela 2.1 - Principais características do layout linear e do funcional

Layout Linear	Layout Funcional
1 - Fabricação de produtos padronizados	1 - Fabricação de vários tipos de produtos. É muito flexível na variação da demanda
2 - Produção em lote	2 - Produção relativamente baixa
3 - Transporte e movimentação contínua	3 - Relativamente há pouca movimentação do produto
4 - Máquinas executam sempre a mesma operação	4 - Máquinas executam operações diversas ajustando-se ao tipo e quantidade de demanda

2.2.2. Vantagens e desvantagens dos diversos tipos de Layout

1. Layout Linear

Vantagens:

- redução de material em processo;
- menor congestionamento nos postos de trabalho;
- pequeno manuseio - menores estragos no material;
- mão-de-obra mais barata (operário não qualificado);
- treinamento facilitado: O operário realiza uma tarefa simples e característica;
- controle de supervisão facilitado;
- reduz movimento de equipamentos, pode ser usado o sistema de correias transportadoras.

Desvantagens:

- menor flexibilidade na demanda;
- quebra de continuidade na produção quando alguma máquina pára.

2. Layout Funcional

Vantagens:

- grande flexibilidade com a variação do produto;
- adaptável a produtos de grande variação sazonal;
- flexível quanto às mudanças na seqüência das operações;
- facilidade de supervisão, pois cada seção tem um chefe especializado;
- continuidade pode ser mantida quando a máquina pára.

Desvantagens:

- grande manuseio;
- maior quantidade de material em processamento.

3. Layout Posicional

Vantagens:

- material pesado não se move;
- flexível a alteração no produto;
- adapta-se a demandas intermitentes;
- menor necessidade de planejamento da produção.

Desvantagens:

- produção relativamente baixa;
- maior cruzamento no movimento de máquinas e operários.

2.2.3. Escolha do tipo de Layout

Deve-se escolher o layout:

- 1) Linear, quando:
 - demanda é aproximadamente constante;
 - produtos não são padronizados;
 - grande produção;
 - fácil balanceamento nos tempos de produção.

- 2) Funcional, quando:
 - produtos são diversos;
 - demanda variável e intermitente;
 - diversas operações requerem tempos diferentes.

- 3) Posicional, quando:
 - quantidade a produzir é reduzida;
 - alto custo na movimentação do produto;
 - não há repetição do trabalho.

2. 3. Modelos matemáticos para layout de processos químicos

Os modelos matemáticos podem ser usados para se obter o layout de processo mais econômico, sujeito a restrições que possibilitem a operação, manutenção e segurança GUIARDELLO (1993). Portanto, todos os modelos objetivam minimizar o custo total, desde que satisfaçam as restrições de espaço livre ao redor dos componentes.

Conforme GUIARDELLO (1993, 1994), a otimização do layout pode ser dividida em três etapas:

* **Divisão da planta em módulos:** agrupamento dos equipamentos que possuem maior número de conexões entre si (ou custo unitário de tubulação), de tal forma a minimizar a distância e o custo de tubulação colocando-se esses equipamentos em um mesmo módulo. O objetivo é a divisão da planta em módulos diferentes.

* **Otimização do posicionamento dos componentes e módulos:** emprego da otimização para posicionar os componentes do layout e, em seguida, os módulos da planta. Para tanto, é necessário satisfazer as restrições de distância mínima entre os componentes e minimizar os custos relacionados ao layout. Nesta etapa, utiliza-se um modelo matemático que

permite diferentes rotações e orientações dos equipamentos, bem como diferentes posições relativas entre os pares de componentes (em três dimensões).

* **Otimização da distribuição da tubulação:** define a localização da tubulação através da construção de uma rede de pontos (vértices) e arcos (conectando os pontos), de tal forma a evitar a interferência com os equipamentos e com outras regiões restritas. A otimização é feita para cada tubo, encontrando-se o percurso de menor custo entre os pontos que correspondem aos extremos do tubo.

2.4. O problema de arranjo físico

Segundo EVANS et al. (1987), os termos facilities planning (planejamento de instalações), facilities location (localização de instalações), facilities design (projeto de instalações) e facilities layout (arranjo físico de instalações) são empregados freqüentemente de forma indistinta, particularmente em problemas levantados em empresas manufatureiras. Para tornar possível a distinção entre os termos e suas possíveis relações, TOMPKINS & WHITE (1984) propuseram uma classificação hierárquica onde o planejamento de instalações subdivide-se em:

- 1) localização de instalação significa a posição que uma instalação tem em relação ao mercado, recursos, concorrentes, fornecedores, grupo de trabalho, energia, ambiente etc;
- 2) projeto de instalações significa a forma de contribuição dos componentes da instalação com os objetivos da mesma, subdividindo-se em:
 - a) projeto estrutural tem as propriedades físicas de uma instalação, por exemplo, os materiais usados na construção, o projeto mecânico, utilidades, estéticas e paisagem;
 - b) projeto de arranjo físico consiste do planejamento da produção ou de áreas de trabalho, de armazenamento, de escritórios, de pessoal, de manejo de máquinas ou equipamentos etc;
 - c) projeto de sistemas manuais significando fluxos eficientes de materiais, de pessoas, de informações ou de equipamentos sobre uma instalação.

O problema de arranjo físico de instalações se caracteriza como um problema de minimização combinatorial. Tem uma função objetivo a ser minimizada que é definida sobre um conjunto discreto, cujos elementos são todas as possíveis alocações de

instalações. O número de elementos do conjunto de configurações cresce fatorialmente com o aumento do número N de instalações, de modo que a busca não pode ser feita de forma exaustiva quando N é grande. Também, pelo fato de tal conjunto ser discreto, impossibilita o uso das noções de continuidade, dificultando nos processos que utilizam o conceito de direção para caminhar no sentido do ótimo CORTES (1996).

2.5. Algoritmos para solução do problema de arranjo físico

Encontram-se na literatura diversos trabalhos que apresentam a técnica de branch and bound para solução do problema de arranjo físico. Os dois primeiros algoritmos do tipo branch and bound para solução do problema de arranjo físico de instalações, foram desenvolvidos por GILMORE (1962) & LAWLER (1963). A diferença entre seus trabalhos está em computar os limites. Ambos os algoritmos avaliam implicitamente todas as soluções potenciais. PIERCE & CROWSTON (1971) classificam este tipo de enumeração como técnica de enumeração controlada. Caso não fosse considerado um limite para podar a árvore de decisão, como citado nos métodos acima, o procedimento passaria a ser uma técnica de enumeração completa que é ineficiente computacionalmente.

Além destes, dois outros algoritmos foram desenvolvidos por LAND (1963) e por GAVETT & PLYTER (1966). Estes algoritmos alocam pares de instalações enquanto os dois primeiros algoritmos alocam uma instalação por vez.

O algoritmo ótimo tem como característica básica, atribuir passo a passo, uma instalação por vez. Em cada passo ocorrem retornos, onde algumas atribuições são excluídas e o processo de busca continua.

PIERCE & CROWSTON (1971) apresentaram um algoritmo que se comporta na base de passo a passo excluindo pares de atribuição da solução do problema. Os algoritmos exatos apresentados utilizam muito espaço de memória e tempo computacional (BURKARD, 1984).

LAWLER & ROUCAIROL (1985) sugerem o uso do algoritmo de branch and bound paralelo para encontrar o ótimo. Tais algoritmos fazem uma busca paralela (simultânea) sobre vários ramos na árvore de decisão. Entretanto, resultados

computacionais apresentados pelos autores indicam que o algoritmo requer muito tempo computacional para resolver problemas com doze ou mais instalações.

GRAVES & WHINSTON (1970) desenvolveram um algoritmo heurístico que se baseia em determinar limites usando propriedades estatísticas da função objetivo. Esses limites são utilizados num procedimento enumerativo que encontra soluções sub-ótimas.

BURKARD (1973) propôs um algoritmo ótimo para resolver o problema baseado na redução de uma matriz quadrada. A redução é feita de uma matriz quadrada A para uma outra matriz quadrada A' de elementos não negativos, com pelo menos um zero em cada linha e cada coluna, com o objetivo de reduzir a importância dos termos quadráticos na função objetivo e aumentar a dos termos lineares. LITTLE et al. (1963) utilizaram o processo de redução no problema do Caixeiro Viajante.

BAZARAA (1975) desenvolveu um algoritmo utilizando a técnica de branch and bound para o problema geral de arranjo físico de instalação, obtendo a cada passo um arranjo físico parcial P , no qual determina um limite inferior LB dos custos das possíveis combinações do arranjo físico parcial P . Enquanto LB for menor que o custo do melhor arranjo físico avaliado C^0 , o algoritmo continua alocando uma nova instalação e conseqüentemente aumentando o tamanho $|P|$ do arranjo físico parcial. Quando a busca nesta direção termina e a última instalação não pode ser alocada, uma nova alocação é procurada.

BAZARAA & ELSHAFEI (1979) propuseram um algoritmo que utiliza a técnica de branch and bound para a solução com base na alocação passo a passo de uma instalação em locais ainda não ocupados.

BURKARD (1984) apresenta uma revisão sobre o problema quadrático de atribuição. KAKU & THOMPSON (1986) apresentaram outro algoritmo utilizando a técnica de branch and bound, com melhor desempenho que o algoritmo de LAWLER (1963), especialmente quando os problemas são grandes.

HERAGU & KUSIAK (1991) apresentaram dois modelos para a solução do problema de arranjo físico de instalação: o primeiro linear contínuo com valor absoluto na função objetivo e nas restrições, outro linear misto. PALEKAR et al. (1992) apresentaram um método exato e sugere heurísticas para resolver o problema de arranjo físico estocástico dinâmico.

KELLY et al. (1994) apresentaram uma abordagem determinística através da busca tabu, que tem se mostrado mais poderosa que a simples mudança aleatória. KOUVELIS et al. (1995) apresentaram uma aplicação de um método ótimo na solução do problema de arranjo físico de máquina em linha.

Os algoritmos que utilizam o método de plano de corte para resolver o problema quadrático de alocação foram desenvolvidos por BAZARAA & SHERALI (1980) e BURKARD & BONNINGER (1983).

Os algoritmos ótimos que utilizam as técnicas de branch and bound e de planos de corte gastam muito espaço de memória e tempo computacional na solução dos problemas quadráticos de alocação. Para exemplificar, o maior problema resolvido para o qual foi obtida a solução ótima, por um algoritmo de planos de corte, tinha oito instalações. Outra experiência com estes algoritmos demonstra que a solução ótima encontrada no processo de busca nos vértices da árvore só foi obtida após um número expressivo de soluções terem sido testadas (BURKARD & STRATMAN, 1978 e BAZARAA & KIRCA, 1983), o que estimulou encerrar o processo de buscas no branch and bound antecipadamente, sem verificar a otimalidade, surgindo a aplicação de algoritmos heurísticos de branch and bound.

BURKARD (1984) apresentou dois critérios para o processo de término do algoritmo branch and bound:

- a) o primeiro critério é baseado na limitação do tempo, no qual o algoritmo pára após exceder um limite de tempo pré-definido;
- b) o segundo critério é baseado na qualidade do limite superior, isto é, após um tempo de processamento não obtendo um acréscimo na solução, o limite superior é reduzido de uma certa percentagem.

CAPÍTULO 3

INDÚSTRIA DO PAPEL

3.1.História do Papel

A história do papel está intimamente ligada à reprografia. De todo papel produzido no mundo, 90% é impresso. E foi como suporte reprográfico que o papel surgiu. Desde os primórdios da Humanidade, o Homem vem desenhando as lembranças visuais de sua vida. Isto data de 30 mil anos atrás. Esses desenhos nas paredes das cavernas eram chamados de pictografias. Depois, se tornaram mais complexos, e vieram as ideografias, os cuneiformes persas e até chegar nos hieróglifos egípcios por volta de 2.500 A.C.

Conforme se pode concluir, o desenvolvimento da inteligência humana veio acompanhado pelas representações gráficas, tornando-se cada vez mais complexas, chegando, desse modo, a representar idéias. A História registra o uso de diversos tipos de suportes, como tabletes de barro, tecidos de fibra vegetal, papiros, pergaminhos e, finalmente, o papel.

As espécimes mais antigas de papiro datam de 3.500 A.C. e suas técnicas de preparação permanecem, até hoje, sem uma descrição fidedigna. Os papiros eram preparados à base de tiras extraídas de uma planta abundante no Nilo. Estas tiras eram posicionadas em ângulos retos, molhadas, marteladas e coladas. Apesar da palavra papel ser derivada de papyrus, são produtos completamente diferentes. Em 170 A.C., um método aperfeiçoado para a obtenção de pergaminho permitiu seu uso para a escrita. Sua denominação é derivada do nome do reinado Pergamus.

Em 105 A.C., o imperador chinês Chien-ch'u, irritado em escrever sobre seda e bambu, ordena a seu eunuco Ts'ai Lun, que invente um novo material para a escrita. Ts'ai Lun produz uma substância feita de fibras de casca da amoreira, restos de roupa e cânhamo,

umedecendo e batendo a mistura até formar um mingau. A seguir, usando uma peneira e secando ao sol a fina camada ali depositada, obteve uma folha de papel. O princípio básico desse processo é o mesmo usado até hoje na fabricação do papel.

A manufatura do papel foi um segredo por mais de seis séculos. Contudo, já estava espalhada por toda a China. A partir da captura de alguns artesões chineses pelos mouros em Samarkanda no ano de 751, a fabricação de papel chega a Bagdá e Damasco. Com a expansão muçumana, a manufatura do papel chega à Europa pela Península Ibérica. Data de 1094 a primeira fábrica de papel em Xativa, Espanha, e por volta de 1150 a fábrica de Fabiano, Itália. A partir daí, a Europa começa a difundir a arte de produzir papel: França em 1189, Alemanha em 1291, Inglaterra em 1330. Curiosamente, a idéia de fazer papel, a partir de fibras de madeira, perdeu-se em algum lugar do trajeto, pois o algodão e os trapos de linho se transformaram na principal matéria-prima utilizada.

Quando Gutenberg nasceu, a manufatura de papel já era uma indústria bem desenvolvida por toda Europa. A tinta viscosa, essencial para impressão, também já estava em uso na Alemanha para impressão de títulos por blocos para livros manuscritos. A Gutenberg coube o crédito de vislumbrar as possibilidades culturais e comerciais do processo gráfico de reprodução.

No fim do século XVI, os holandeses inventaram a máquina que permitia desfazer os trapos com maior eficácia. A "holandesa" como ficou conhecido o equipamento, foi se propagando, chegando até nossos dias com o mesmo conceito básico, apesar dos inúmeros aperfeiçoamentos recebidos. A primeira fábrica de papel dos Estados Unidos foi construída na Pensilvânia em 1690.

Em 1719, o francês Réaumur sugeriu o uso da madeira, uma vez que a forte concorrência da indústria têxtil dificultava e encarecia a principal matéria-prima usada na época: o algodão e o linho. Na ausência de um método viável de branqueamento, o papel branco só podia ser obtido a partir de trapos brancos. Como a demanda causada pela Revolução Industrial se intensificava, por causa dos controles escritos e contabilidade, a capacidade produtiva foi diminuindo.

No final do século XVIII, com a descoberta do cloro, o conjunto de matérias-primas se ampliou. O efeito deteriorador exercido pelos novos agentes sobre o material

motivou estudos sistemáticos do processo de branqueamento, levando a criação de métodos e condições que minimizavam tal efeito.

Em 1798, o francês Nicholas L. Robert projetou uma máquina para substituir a fabricação manual por imersão, e produzir um rolo contínuo a partir de uma grande tela de arame sem fim, girada à mão, para filtrar a massa. Incapaz de obter financiamento na França, Robert vende a patente para os irmãos Fourdrinier na Inglaterra, que continuaram a desenvolver o equipamento, até que em 1807 construíram a máquina de papel. O projeto fracassou porque a matéria-prima era cara e escassa.

Se a contínua escassez de matéria-prima fomentava a inovação, a crescente demanda clamava por processos mais eficientes. Em 1850, o alemão Keller, lendo a obra de Réaumur, desenvolveu a máquina para moer madeira e transformá-la em fibras.

Paralelamente ao desenvolvimento da indústria papeleira, as artes gráficas, embalagens, cadernos e outros aplicativos tornaram o papel indispensável ao acelerado progresso vivenciado na época. A primeira ilustração em livros foi impressa por Albrecht Pfister, em 1460, por gravação em madeira. Os livros impressos entre 1570 e 1770 empregavam a ilustração em cobre, ao invés da madeira, o que resultou em perda de qualidade.

Por mais de 400 anos depois de sua invenção, os tipos eram montados manualmente. Apesar das inúmeras tentativas de substituição do processo manual, somente em 1886, com a invenção do linotipo por Ottmar Mergenthaler, foi possível seu uso comercial. A litografia, descoberta por Alois Semefelder em Munique por volta de 1798, também alavancou a impressão artística e, conseqüentemente, o consumo de papel. Era baseada no princípio do processo offset atual.

A incompatibilidade da água com a graxa era provocada pela deposição de uma substância graxa nas áreas a serem impressas numa pedra porosa. A área de reserva era umedecida com uma mistura de goma arábica e água. Este processo, muito popular no meio do século XIX, foi sendo aperfeiçoado ao longo dos anos, até que em 1906, Rubel descobre o processo offset. Ainda que acidental este processo provocou uma verdadeira revolução nas artes gráficas. Pode-se afirmar, que a partir do offset a reprodução gráfica deixou de ser uma arte e passou a ser uma indústria.

A partir do início deste século, a produção de papel foi vigorosamente multiplicada. Acompanhando a segunda Revolução Industrial, a Era da Produção em Massa, os pequenos produtores dão lugar a grandes fábricas, face à economia de escala.

Nesta época, o papel já era barato e a sua produção em massa, constante. Outro grande impulso no consumo de papel, devido ao invento de Chester Carlson, em 1938, foi a xerografia. Em 1960, com o lançamento da Xerox 914, a reprodução gráfica ficou muito simplificada. Dispensaram-se pessoas qualificadas, papéis especiais, reagentes químicos, etc.

Atribui-se à xerografia, o início da terceira Revolução Industrial, a Era da Informação. A velocidade com que a Informação passou a circular teve forte influência no sucesso de muitas empresas. Os ganhos de produtividade nos escritórios foram expressivos.

Ainda há avanços tecnológicos apreciáveis, particularmente, em eletrônicos, computadores, telecomunicações, e a xerografia passa a complementá-los de forma admirável. O papel teve e tem uma participação destacada na cultura contemporânea, tanto que em seu livro *The 100: A Ranking of Influential People in History*, Michael Hart classifica Ts'ai Lun como o sétimo mais importante homem da Humanidade, na frente de Gutenberg (o oitavo) (fonte: *Papel Champion*, 2003).

3.1.1. Século VII A XII - A entrada na Europa - A rota do papel

No século VIII (ano 751), os chineses foram derrotados pelos árabes. Dentre os prisioneiros que caíram nas mãos dos árabes, estavam fabricantes de papel, que levados a Samarkanda, a mais velha cidade da Ásia, transmitiram seus conhecimentos aos árabes. A técnica de fabricar papel evoluiu em curto espaço de tempo com o uso de amido derivado da farinha de trigo, para a colagem das fibras no papel e o uso de sobras de linho, cânhamo e outras fibras encontradas com facilidade, para a preparação da pasta. A entrada na Europa foi feita pelas "caravanas" que transportavam a seda (fonte: *Bracelpa*, 2004).

3.1.2. Melhoramentos surgidos no século X

- uso de moinhos de martelos movidos a força hidráulica.
- emprego de cola animal para colagem.
- emprego de filigrana.

A França estabelece seu primeiro moinho de papel em 1338, na localidade de La Pierre. Assim, da Espanha e Itália, a fabricação de papel se espalhou por toda a Europa.

Antes da invenção da imprensa por Gutemberg, em 1440, os livros que eram escritos à mão, tornaram-se acessíveis ao grande público, exigindo quantidades maiores de papel. Em meados do século XVII, os holandeses haviam conseguido na Europa o progresso mais importante na tecnologia da fabricação de papel. Diante da falta de força hidráulica na Holanda, os moinhos de papel passaram a ser acionados pela força dos ventos.

Desde 1670, no lugar dos Moinhos de Martelos, passaram a ser utilizadas as Máquinas Refinadoras de Cilindros (Holandesa). Lentamente a Holandesa foi se impondo, complementando os Moinhos de Martelo, que preparava a semipasta para obtenção da pasta refinada e mais tarde como Pila Holandesa Desfibradora que foi utilizada na Alemanha em 1710/1720 (fonte: Bracelpa, 2004).

3.1.3.A fabricação do papel – Método antigo

A pasta de trapo foi o primeiro material usado para a fabricação do papel. Os trapos eram classificados, depurados, e depois cortados em pedaços, à mão; mais tarde vieram as máquinas cortadoras simples.

Os trapos, exceto os de linho, eram submetidos a um processo de maceração ou de fermentação. O processo durava, de cinco a trinta dias utilizando-se recipientes de pedra, abrandando os trapos, em água. Para os trapos finos de linho era suficiente deixá-los de molho várias horas em lixívia de potassa empregando-se por cada cem quilos de trapos, uns quatro quilos de potassa bruto. Para a obtenção de um bom papel era imprescindível a fermentação dos trapos (fonte Bracelpa, 2004).

3.1.3.1.Os moinhos de martelo

Os trapos fermentados eram tratados para serem desfibrados. Em virtude de esse processo ser duro e penoso, a Holandesa começou a ser usada no início do século XVII, para decompor a fibra dos trapos.

Esta "máquina refinadora" fazia em quatro ou cinco horas a mesma quantidade de pasta que um antigo moinho de martelo com cinco pedras gastava vinte e quatro horas. No ano de 1774, o químico alemão Scheele descobriu o efeito branqueador do cloro, conseguindo com isso, não só aumentar a brancura dos papéis como também, empregar como matéria-prima, trapos mais grossos e coloridos (fonte: Bracelpa, 2004).

3.1.4.Os séculos XVII e XIX:

Em 1798 teve êxito a invenção, segundo a qual foi possível fabricar papel em máquina de folha contínua. Inventada pelo francês Nicolas Louis Robert que por dificuldades financeiras e técnicas não conseguiu desenvolvê-la, cedeu sua patente, aos irmãos Fourdrinier, que a obtiveram juntamente com a Maquinaria Hall, de Dartford (Inglaterra) e posteriormente com o Engº Bryan Donkin. Assim a Máquina de Papel Fourdrinier (Máquinas de Tela Plana) foi a primeira máquina de folha contínua que se tem notícia.

Depois da Máquina Fourdrinier foram lançadas no mercado outros tipos de máquinas:

- a máquina cilíndrica;
- a máquina de partida automática.

3.1.5.Evoluções marcantes

Em 1806 Moritz Illig substituiu a cola animal, pela resina e alumínio. Quando a fabricação de papel ganhou corpo, o uso de matéria-prima começou a ser um sério problema: os trapos velhos passaram a ser a solução, mas com a pequena quantidade de

roupa usada e com o crescente aumento do consumo de papel, os soberanos proibiram as exportações. Em face disto, os papeteiros tiveram que dedicar suas atenções aos estudos do naturalista Jakob C. Schaeffer que pretendia fazer papel usando os mais variados materiais, tais como: musgo, urtigas, pinho, tábuas de ripa, etc. Em seis volumes Schaeffer editou "Ensaio e Demonstrações para se fazer papel sem trapos ou uma pequena adição dos mesmos". Infelizmente, os papeteiros da época rejeitaram os Ensaio, ao invés de propagá-los.

Na busca para substituir os trapos, Mathias Koops edita um livro em 1800, impresso em papel de palha. Em 1884, Friedrich G. Keller fabrica pasta de fibras, utilizando madeira pelo processo de desfibramento, mas ainda junta trapos à mistura. Mais tarde percebeu que a pasta assim obtida era formada por fibras de celulose impregnadas por outras substâncias da madeira (lignina). Procurando separar as fibras da celulose da lignina, foram sendo descobertos vários processos:

- Processo de pasta mecânica;
- Processo com soda;
- Processo sulfito;
- Processo sulfato (Kraft).

A introdução das novas semipastas deu um importante passo na eclosão de novos processos tecnológicos na fabricação de papel. Máquinas correndo a velocidade de 1.200m por minuto, o uso da fibra curta (eucálio) para obtenção de celulose, a nova máquina Vertform que substituiu com vantagens a tela plana, são alguns fatos importantes (fonte: Bracelpa, 2004).

3.1.6.A fabricação do papel – Método atual

Tem por objetivos a fabricação de papéis tissue (absorventes) semi-acabados com fibras celulósicas, de acordo com padrões de maciez, resistência e alvura.

A produção de papel é um processo de transformação no qual a celulose (matéria-prima básica) juntamente com aditivo, que dão as características desejadas ao papel, o qual serão diluídos, formando uma suspensão. Esta suspensão entra na máquina de papel onde através de um desaguamento contínuo e progressivo ocorre a formação da folha que após passar por prensas desaguadoras e um sistema de aquecimento, obtém-se o papel semi-acabado.

Para a fabricação do papel são utilizadas com matérias-primas fibras celulósicas virgens ou recicladas, sendo classificadas como:

- Fibras virgens: são fibras longas (coníferas) ou curtas (folhosas) branqueadas;
- Fibras recicladas: são misturas, onde predominam as fibras curtas.

Uma folha contendo exclusivamente fibra celulósica, não possui as características do papel que geralmente são desejados e adequados para conseguir a versatilidade que caracteriza os papéis existentes no mercado. Em decorrência à isto, a indústria papelreira tornou-se uma grande consumidora de produtos químicos que são adicionados para dar ou melhorar certas propriedades do papel, a fim de eliminar ou controlar certos problemas na operação.

Principais produtos químicos utilizados na fabricação de papel:

- **Hidróxido de Sódio, Aluminato de Sódio, Carbonato de Sódio, Sulfato de Alumínio e Dióxido de Carbono:** são usados como controladores de pH;
- **Produtos catiônicos:** são utilizados como auxiliares de flotação;
- Produtos que quando adicionados à massa conferem-lhes depois de seca resistência a úmido:

a) Cloreto de cálcio: é usado no controle de dureza da água do sistema, ajudando também na formação de coating no secador e como fixador de corante;

- Produtos usados como alvejantes ópticos:

a) Talco Micronizado: usado na relação dos efeitos nocivos do pith residual da celulose e outros contaminantes sobre as vestimentas da máquina.

- Produtos que adicionados juntamente com corantes, promovem uma melhor fixação das fibras:

- a) **Produtos Orgânicos:** que ajudam a combater a formação de espumas.
- b) **Monofosfato Amônio:** produto inorgânico cuja finalidade é criar uma película que protege o secador contra desgastes mecânicos;
- c) **Mistura de Óleo e Polietileno Glicol:** que com água formam uma emulsão estável, controlando com isso a aderência da folha de papel ao secador.

As máquinas de papel podem ser classificadas de acordo com a transmissão do movimento, em lado esquerdo ou direito. A classificação é feita olhando-se da desenroladeira para a tela, procurando identificar o lado pelo o qual é acionado.

Hoje com o advento da tecnologia, as máquinas de papel tissue foram desenvolvidas com a formação em dupla tela, alcançando maiores velocidades e homogeneidade. São as Crescent Former e as Duoformers, substituindo as antigas Foundrinier (Fonte: Bracelpa, 2004).

3.1.7. Partes de uma máquina de fabricação contínua de papel

Baseado em dados obtidos no site da Bracelpa.

3.7.1.1. Seção de Formação

As tarefas básicas a serem realizadas pela seção de formação de uma máquina de papel são destacadas a seguir:

- Diluir a massa até uma consistência suficientemente baixa que permita um alto grau de uniformidade na dispersão das fibras;
- Distribuir a suspensão diluída de fibra na seção de formação, mantendo-as dispersas de forma homogênea;
- Depositar individualmente e de maneira uniforme as fibras sobre a tela, ao mesmo tempo em que se inicie a drenagem da água pela tela;

- Compactar o material fibroso enquanto em estado plástico, a fim de se obter um contato íntimo entre as fibras;
- Por meio de sucção, remover o máximo possível a água das fibras, antes que a folha formada seja transferida para outra seção.

3.7.1.2. Seção de prensagem úmida da folha de papel

A função primordial da prensagem úmida de uma máquina de papel é remover a quantidade máxima possível de água da folha de papel antes de submetê-la a secagem por calor. Outras funções são a redução do volume específico e a melhoria da lisura da folha. A capacidade da prensa em desempenhar estas funções, sem causar danos ao papel, como esmagamento, perdas de finos, rearranjo das fibras e enrugamento, depende do projeto da prensa, do feltro e das características operacionais.

Em uma máquina de papel com mesa plana, a água é removida em quatro etapas: drenagem na tela da mesa plana, por vácuo aplicado nas caixas e rolo de sucção, prensas úmidas e secagem com aplicação de calor.

Nas máquinas modernas de alta produção, a prensagem geralmente é feita com rolos de sucção que possuem maior capacidade de remoção de água do que as prensas lisas (de rolos lisos). A secagem é efetuada pela ação combinada da compressão mecânica e da sucção, aplicada através da estrutura porosa do rolo inferior. A água retirada da folha de papel, por compressão, passa pela estrutura tramada do feltro e é aspirada para dentro dos orifícios do rolo de sucção.

3.7.1.3. Seção de secagem

Em uma fábrica de papel, entende-se por secagem o processo de remoção de água por evaporação, aplicando-se calor.

O secador Yankee tem forma cilíndrica, com uma superfície que entra em contato com a folha de papel, e é altamente polida. Este equipamento foi desenvolvido para

proporcionar uma lisura elevada em um dos lados do papel, como é desejável na manufatura de papel envelope. Devido à alta eficiência, o secador Yankee é também muito utilizado para produzir papéis absorventes, pois não expõe a folha úmida a tensões elevadas que podem ocorrer em máquinas de alta velocidade.

A eficiência do equipamento depende essencialmente do contato íntimo entre a folha e a superfície aquecida, o que é conseguido pressionando-se a folha contra a parte inferior do secador. O rolo possui uma cobertura de borracha, sendo abaulada de acordo com a pressão aplicada e, empregam-se às vezes dois rolos de pressão: um para transferir o papel ao Yankee e outro para melhorar o contato entre o papel e o secador.

O secador Yankee remove dez vezes mais água que secadores comuns, com a mesma área de secagem disponível, em igual período de tempo; é munido de uma cifa muito eficiente, que quebra a camada de ar saturado que circunda a superfície do papel, e continuamente insufla ar quente e seco (98° C).

3.7.1.4. Enrolamento ou Corte

A seção de enrolamento ou corte é a última seção da máquina de papel; do rolo-cabeceira até a entrada na seção de enrolamento ou corte, o processo de fabricação da folha é contínuo. Neste ponto, torna-se necessário transformar a folha contínua em unidades finitas e independentes, a fim de facilitar a sua manipulação e utilização posterior.

Basicamente, existem dois princípios usados no enrolamento do papel: enrolamento por acionamento na face e enrolamento por acionamento no eixo. Cada um deles originou uma série de configurações de enroladeiras.

No enrolamento por movimento axial, a folha é enrolada num canudo fixo em um eixo e acionado mecânica ou eletricamente, porém o controle e a operação deste tipo de enroladeira são complicados, pois impossibilita sua utilização em máquinas de alta velocidade, tendo utilização cada vez menos freqüente.

No enrolamento por acionamento na face, há necessidade de regulagem da velocidade de enrolamento à medida que aumenta o diâmetro da bobina, pois a velocidade periférica continua constante. As enroladeiras que trabalham com esse sistema são

conhecidas como “Pope” ou de superfície. São compostas de um cilindro de ferro fundido, parecido com um cilindro secador cujo eixo é oco, podendo ser instalado um sistema de refrigeração; e de um par de braços móveis, nos quais se apóia o canudo principal onde está enrolado o papel. Em cima do cilindro está colocado um canudo auxiliar, apoiado em braços móveis, e a folha passa entre os dois antes de ser enrolada no canudo principal. O enrolamento se faz forçando o canudo contra o cilindro acionador.

Quando a bobina de papel atinge seu diâmetro máximo, rasga-se a folha manualmente ou por meio de ar comprimido, obrigando-a a enrolar-se sobre o canudo auxiliar, sem que haja interferência com a bobina já pronta. Em seguida é retirada com o auxílio da ponte rolante e o canudo auxiliar é colocado em seu lugar.

3.7.1.5. Características do produto final

Jumbo de aproximadamente 1.200 Kg, com 2,15 m de largura e 1,80 m de diâmetro. O papel semi-acabado atende a uma série de variáveis e atributos: gramatura, espessura, resistência mecânica, maciez, tonalidade e alvura.

3.2. Esquema geral de funcionamento de uma Fabricação do Papel

Este esquema de funcionamento de fabricação de papel baseia-se na apostila de obtenção de celulose e papel da ABTCP (1999).

3.2.1. Preparação de Massa

3.2.1.1. Desagregação da Celulose

A celulose em folhas ou em tabletes é desagregada em um equipamento chamado desagregador. Quando a fábrica de celulose é integrada com a fábrica de papel, a celulose já vem em suspensão e é armazenada em tanques de distribuição de massa.

O desagregador, ou “hydrapulper” nada mais é do que um liquidificador doméstico de proporções gigantescas, com capacidade para 500 a 20.000 litros, ou mais.

3.2.1.2. Refinação

Posteriormente ao processo de desagregação, a pasta de celulose precisa ser refinada. A refinação consiste em submeter às fibras de celulose a uma reação de corte, esmagamento ou fibrilação.

A fibrilação aumenta a superfície da fibra em contato com o meio, que é a água. Sendo a celulose um material higroscópico (tem afinidade com a água), ela irá reter em sua superfície tanto mais água quanto mais refinada for.

O grau de refinação (maior ou menor) varia em função das características do papel que se pretende fabricar. A refinação é realizada em refinadores cônicos e/ou discos. Um jogo é fixo, chamado estator, o outro é rotativo, chamado rotor. O rotor trabalha pressionado contra o estator e a celulose passa entre os dois, onde ocorre o processo de refinação (corte, fibrilação e hidratação).

3.2.1.3. Preparação da Receita

Compostos formados pela aglomeração de diversos polímeros (grandes moléculas formadas pela união de duas ou mais moléculas de um mesmo composto químico). Após refinada, a pasta celulósica entra em um tanque de mistura ou tanque de preparo de receita. Nesse tanque, a celulose é misturada com os demais componentes (cargas, químicos e aditivos), os quais farão parte da receita do papel. Essa fase do processo pode ser contínua ou em batelada.

3.2.1.4. Depuração

Depuração é o nome que se dá a operação de limpeza da mistura de celulose com os demais componentes da receita. Destina-se a retirar corpos estranhos, sujeiras, bolos de

massa ou fibras enroladas que são indesejáveis para a aparência e finalidade da folha de papel.

Os sistemas de depuração mais conhecidos são os depuradores centrífugos ou ciclones e os depuradores verticais. Os depuradores centrífugos são cones, nos quais a suspensão de fibras entra tangencialmente sob pressão provocando um movimento de rotação interna (vórtice), gerando uma força centrífuga que retira, por diferença de densidade, todas as impurezas ou contaminantes mais pesados que as fibras. Os depuradores verticais são constituídos de uma carcaça cilíndrica vertical, no interior da qual existe uma peneira perfurada que retém todos os bolos de massa, fibras enroladas e corpos estranhos, deixando passar a massa.

Os equipamentos de depuração são indispensáveis em uma máquina de papel, onde se pretende fazer papel de boa qualidade. Após passar pelo sistema de depuração, a suspensão de fibras com cargas, químicos etc., alcança a máquina de papel propriamente dita.

3.2.2.Máquina de Papel

A máquina de papel, para melhor entendimento, pode ser dividida em partes fundamentais. A primeira delas é a caixa de entrada.

3.2.2.1.Caixa de Entrada

A caixa de entrada trata-se de um compartimento que tem a largura da tela formadora (onde a folha de papel é formada), ou pouco mais, e que tem a função de distribuir a suspensão de fibras sobre a tela, como uma lâmina contínua, o mais uniformemente possível. O jato de suspensão de fibras, ao sair da caixa de entrada, passa por uma abertura delimitada pelos lábios superior e inferior. O lábio superior é regulável e da sua maior ou menor abertura depende a vazão e a velocidade do jato que deságua sobre a tela formadora.

No interior da caixa de entrada existe um ou mais cilindros perfurados rotativos, que tem a função de uniformizar a suspensão próximo ao ponto de saída, evitando floculação, isto é, aglomeração de fibras formando flocos que prejudicam a uniformidade da folha de papel ou sua aparência e, conseqüentemente, a má formação.

3.2.2.2.Mesa Plana

Mesa plana é a parte da máquina de papel onde se dá a formação da folha. É constituída de uma mesa com suporte e colunas de aço, sobre o qual corre a tela formadora, apoiada sobre os elementos desaguadores, rolo de cabeceira, rolo de sucção e rolos guia. A suspensão de fibras e cargas, ao passar pelos lábios da caixa de entrada, deságua sobre a tela formadora que está em movimento. Esta suspensão tem uma concentração que varia entre 4 a 15 g/L (gramas de sólido por litro de suspensão), dependendo da máquina, do tipo de papel, da velocidade etc.

A tela formadora é feita de plástico ou metal (bronze fosforoso ou aço inóx) e tem a malha bastante fechada (80 mesh para papéis grossos e 100 mesh para papéis finos). Ao desaguar sobre a tela, as fibras ficam retidas na superfície e a água passa através da tela, caindo em calhas apropriadas. Esta água, rica em partículas de fibras e cargas, é recirculada para diluir a massa (água de reciclagem) e realimentar a máquina.

Os elementos desaguadores, além de apoiar a tela, ajudam a retirar a água em suspensão. São eles os cilindros esgotadores, lâminas foil, caixas de sucção etc.

Além do movimento longitudinal, a tela tem um outro movimento transversal que é o sacudidor (shake). A conjugação certa da freqüência do sacudimento com a amplitude é um dos pontos-chave para uma boa formação do papel.

3.2.2.3.Prensas

A folha de papel, ao sair da mesa plana já está formada, porém 80 a 85 % de sua constituição ainda é pura água. A finalidade das prensas é retirar parte dessa água. A prensa

é formada por 2 rolos cilíndricos, sendo o inferior de borracha ou ebonite e o superior, de material mais duro como granito ou microrock.

As máquinas de papel têm 2 ou 3 prensas. As prensas trabalham com feltro especial, agulhado, que serve para apoio e condução da folha. No ponto de encontro entre os dois rolos é feita a prensagem do papel e feltro. A água contida no papel é transferida para o feltro.

Ao sair das prensas para a fase seguinte do processo a folha de papel ainda contém 60 a 65 % de água. Em algumas máquinas, com determinados tipos de papel, se pode chegar a 50 - 55 %.

3.2.2.4. Secagem

A secagem é o setor da máquina de papel onde se faz a secagem final da folha e se realizam a cura das resinas adicionadas. A secagem é composta de inúmeros cilindros secadores. O número de secadores depende do tipo e do tamanho da máquina. Os secadores são cilindros de aço com superfície polida e trabalham com pressão de vapor.

Para condução da folha, entre os cilindros secadores, usam-se feltros ou telas secadoras. A água evaporada do papel é extraída por coifas especiais. A umidade da folha, ao deixar a seção de secagem, varia de 3 a 8 %.

Algumas máquinas de papel dispõem, ainda nessa fase, de:

- cilindro monolustro ou monolúcido - grandes cilindros secadores onde o papel é prensado contra sua superfície, proporcionando em uma das faces lisura e brilho acentuados;
- prensa de colagem - equipamentos que se destinam à impregnação superficial com químicos, para as mais diversas finalidades. Como foi mencionado anteriormente, temos como exemplo o papel offset, no qual é aplicada uma solução de amido cozido, que lhe confere melhores características de impressão, maior resistência superficial e absorção mais controlada da tinta.

3.2.2.5. Calandra e Enroladeira

A calandra é usada para o acerto da espessura e aspereza do papel, ainda na máquina de papel, enquanto que na enroladeira, a folha contínua de papel vai sendo bobinada até um determinado diâmetro, daí partindo para os vários processos de beneficiamento.

3.3. Panorama Atual

O Brasil é o 11º produtor e consumidor mundial de papel, participando com cerca de 2,4% da produção e exportações mundiais de papel, que correspondem, principalmente, aos excedentes de papéis de imprimir e escrever, de embalagem e papel cartão. O consumo de papéis no Brasil, na década de 90, apresentou taxa média de crescimento da ordem de 5% a.a., bastante superior à média mundial de 3,2% a.a. Entretanto, a demanda interna, nos últimos anos, se apresentou abaixo desses índices médios e mesmo irregular e declinante, situação que se mostrou similar à mundial.

Em relação às fibras, ao longo dos últimos dez anos, o Brasil evoluiu da 10ª para a 8ª posição entre os maiores consumidores mundiais de fibras virgens, com 2,5% do volume global consumido. O País é o 7º produtor mundial de celulose, contribuindo com 4% da produção mundial, sendo o terceiro fabricante em termos de celulose e pastas de mercado e o maior produtor mundial de celulose de eucalipto.

No comércio internacional, além de se reafirmar como principal exportador de celulose de eucalipto, o Brasil é um importante fornecedor de papéis de imprimir e escrever não revestidos e de embalagem. Pelo lado das importações brasileiras, destacam-se o papel de imprensa e os papéis de imprimir e escrever revestidos.

As exportações brasileiras de celulose e papel em 2003 foram da ordem de US\$ 2,8 bilhões, representando 3,9% da balança comercial do País. Esse valor foi 38% superior ao do ano anterior, refletindo a melhoria dos preços internacionais e aumento dos volumes exportados, de 33% para celulose e de 22% para papel. Quanto às importações, o dispêndio de divisas dois de US\$ 561 milhões em 2003 contra US\$ 593 milhões no ano anterior.

O comércio internacional de celulose tem uma dimensão de 34 milhões de toneladas, com a fibra de eucalipto participando com 6 milhões de toneladas, das quais o Brasil contribui com 55%.

O comércio internacional de papel movimentava cerca de 100 milhões de toneladas anualmente, sendo imprimir e escrever, embalagem, imprensa e papel cartão as principais categorias comercializadas, com contribuições de 40%, 23%, 17% e 13% do volume total movimentado, respectivamente. O Brasil exporta, principalmente, papel de imprimir e escrever, papel de embalagem e papel cartão que representam, respectivamente, 1,6%, 2,2% e 0,8% do comércio mundial das respectivas classes.

Tabela 3.1 - Evolução da produção e destino

EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO E DESTINO DO PAPEL				
Distribuição	2003		2004	
	Acumulado	Maio	Acumulado	Maio
Produção	1.922.018	656.431	1.989.144	684.993
Consumo Próprio	373.190	127.130	396.380	145.788
Vendas Domésticas	1.148.093	404.100	1.119.376	398.557
Vendas Externas	345.468	128.626	439.523	159.089

Fonte: Revista O Papel nº6/Junho 2004

3.3.1. Papéis para fins sanitários (Tissue)

Essa categoria abrange os papéis higiênicos, que respondem por 80% da produção, as toalhas (16%) e guardanapos/lenços (4%), além da chamada "linha institucional" para atendimento a consumidores maiores, como redes de fast-food, hospitais, escritórios, indústrias, etc. O Brasil contribui com 3,1% da produção mundial e é o 8º produtor mundial de papel sanitário.

As cinco maiores empresas produtoras - Klabin Kimberly, Santher, Melhoramentos, Manikraft e Mili – concentram 53% do volume total produzido, e tem sido observado um movimento de aquisições, associações e modernizações implicando no aumento de capacidade e modificações de market-share.

Acredita-se na continuidade do movimento de concentração, por força de movimento semelhante no mercado varejista, onde as grandes redes de supermercados exigem a negociação de volumes cada vez maiores. Em 2003, a produção desse papel cresceu 1,3% para um aumento de demanda de 0,5%. A demanda interna tem sido influenciada pelo aumento de renda da população, tem sido atendida pela expansão correspondente da produção.

Tabela 3.2 - Classificação do papel Tissue

PAPÉIS PARA FINS SANITÁRIOS				
Categorias	2003		2004	
	Acumulado	Março	Acumulado	Março
Produção	169.691	57.615	177.562	61.442
Hig.Popular	11.483	3.820	10.665	3.613
FSB.Qualidade	45.110	15.869	36.555	12.320
FSA.Qualidade	48.542	16.615	64.840	22.884
Folha Dupla	20.950	6.832	20.890	6.507
Outros Tipos	43.606	14.479	44.612	16.118
Consumo Próprio	-	-	-	-
Vendas Domésticas	155.892	52.377	166.319	57.658
Vendas Externas	9.924	3.331	9.883	3.613

Fonte: Revista O Papel n°6/Junho 2004

3.4. Tipos de Papéis

Esta classificação de papéis baseia-se na nomenclatura da BRACELPA - Associação Brasileira de Celulose e Papel.

Tabela 3.3 – Tipos de Papéis

Tipos de Papéis	
	Bíblia
	Bouffant 1 ^a
	Bouffant 2 ^a
	Couché
	Base para Couché
	Couché fora de Máquina
Papéis de Imprimir	Couché de Máquinas
	Imprensa
	Jornal
	Mimeógrafo
	Monolúcido
	Monolúcido de 1 ^a
	Offset
	Apergaminhado
	Apergaminhado (Bond)
Papéis de Escrever	Super-Bond (Bond cores)
	Segundas vias (Flor Post)
	Estiva e Maculatura
	Manilhinha – Padaria
	Manilha – HD – Hambuguês – Havana –
	LD – Macarrão
	Tecido
	Fósforo
	Strong de 1 ^a
Papéis de Embalagens	Strong de 2 ^a
	Seda
	Impermeáveis
	Glassine, cristal ou pergaminho
	Granado
	Greaseproof
	Fosco
Papéis de Embalagens pesadas	Kraft
	Kraft natural para sacos multifolhados
	Kraft extensível
	Kraft natural ou em cores para outros fins
	Kraft branco ou em cores
	Tipo Kraft de 1 ^a

	<p>Tipo Kraft de 2ª Para papelão ondulado Miolo(fluting) Capa de 1ª(kraftliner) Capa de 2ª(testliner) White top liner</p>
Papéis para fins Sanitários	<p>Higiênico Popular Folha simples de boa qualidade Folha simples de alta qualidade Folha dupla de alta qualidade Toalha de cozinha e de mão Guardanapo Lenço Lenço hospitalar</p>
Papel Cartão	<p>Duplex Triplex Sólido(Folding) Cartolina Para copos Branca e cores para impressos Outras branca e cores Papelão Papelão madeira ou papelão paraná Papelão Cinza Papelão laminado Polpa moldada</p>
Papéis Especiais	<p>Base para carbono Cigarro Ponteiras Bastão Crepados Desenho Heliográfico Absorvente filtrante Filtrante</p>
Não Classificados	<p>Absorvente base para laminados Papel Kraft absorvente para impregnação Kraft especial para cabos elétricos Kraft especial para fios telefônicos Kraft especial par condensadores Papéis para utilização em envelopes Papéis decorativos Papéis químicos</p>

CAPÍTULO 4

MODELO UTILIZADO E MÉTODO DE RESOLUÇÃO

O modelo matemático utilizado foi extraído de GUIRARDELLO (1993) e consiste de uma função objetivo de minimização do custo total da planta (Eq. 1), quanto ao posicionamento dos componentes no layout, e de uma série de restrições visando, principalmente, a segurança e o fácil acesso à planta. Este modelo também foi utilizado nos trabalhos realizados por PISSINATO (2001).

4.1. Implementação do Modelo Original em GAMS

O modelo foi implementado no software comercial de otimização GAMS, e as equações seguem abaixo.

$$\min \quad 2 C^{\text{per}} (x + y) + \sum_{i=1}^{N_{cp}} c_i^s + \sum_{k=1}^{N_{pi}} C_k^p [l_k^{x+} + l_k^{x-} + l_k^{y+} + l_k^{y-} + l_k^{z+} + l_k^{z-}]$$

$$x, y, z, C_i^s$$

$$l_k^{x+}, l_k^{x-}, l_k^{y+}, l_k^{y-}, l_k^{z+}, l_k^{z-} \quad (1)$$

$$x_i, y_i, z_i, x_p^n, y_p^n, z_p^n$$

$$d_{ij}^x, d_{ij}^y, d_{ij}^z$$

$$w_{ip}, w_{ij}^x, w_{ij}^y, w_{ij}^z$$

A função objetivo acima (Eq. 1) inclui o custo de perímetro da planta, o custo de suportes de cada equipamento e o custo de tubulações. Esta função é sujeita às seguintes restrições:

- Eq. (2) - cálculo do custo de suporte de cada componente i através de uma função convexa linear por partes (4 segmentos):

$$C_i^s \geq C_{ik}^{sa} \cdot \left(z_i + \frac{I}{2} C_i \right) + C_{ik}^{sb} \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, N_{cp} \quad k = 1, \dots, 4$$

- Eq. (3) - cálculo da dimensão (largura) x da planta, a partir da posição máxima na direção x de todos os componentes:

$$x \geq x_i + \frac{I}{2} A_i \cdot (w_{i1} + w_{i3} + w_{i5} + w_{i7}) + \frac{I}{2} B_i \cdot (w_{i2} + w_{i4} + w_{i6} + w_{i8}) \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, N_{cp}$$

- Eq. (4) - cálculo da dimensão (comprimento) y da planta, a partir da posição máxima na direção y de todos os componentes:

$$y \geq y_i + \frac{I}{2} B_i \cdot (w_{i1} + w_{i3} + w_{i5} + w_{i7}) + \frac{I}{2} A_i \cdot (w_{i2} + w_{i4} + w_{i6} + w_{i8}) \quad (4)$$

$$i = 1, \dots, N_{cp}$$

- Eq. (5) - cálculo da dimensão (altura) z da planta, a partir da posição máxima na direção z de todos os componentes:

$$z \geq z_i + \frac{I}{2} C_i \quad (5)$$

$$i = 1, \dots, N_{cp}$$

- Eq. (6,7 e 8) - cálculo do limite mínimo para as posições centrais x_i , y_i , z_i de cada componente, respectivamente:

$$x_i \geq \frac{I}{2} A_i \cdot (w_{i1} + w_{i3} + w_{i5} + w_{i7}) + \frac{I}{2} B_i \cdot (w_{i2} + w_{i4} + w_{i6} + w_{i8}) \quad (6)$$

$$i = 1, \dots, N_{cp}$$

$$y_i \geq \frac{I}{2} B_i \cdot (w_{i1} + w_{i3} + w_{i5} + w_{i7}) + \frac{I}{2} A_i \cdot (w_{i2} + w_{i4} + w_{i6} + w_{i8}) \quad (7)$$

$$i = 1, \dots, N_{cp}$$

$$z_i \geq \frac{I}{2} C_i + E_i^l \quad (8)$$

$$i = 1, \dots, N_{cp}$$

- Eq. (9,10 e 11) - cálculo do limite mínimo para as distâncias d_{ij}^x , d_{ij}^y e d_{ij}^z entre as posições centrais de cada par de componentes i e j , evitando sobreposição de equipamentos:

$$\begin{aligned} d_{ij}^x \geq & \frac{I}{2} A_i \cdot (w_{i1} + w_{i3} + w_{i5} + w_{i7}) + \frac{I}{2} B_i \cdot (w_{i2} + w_{i4} + w_{i6} + w_{i8}) + \\ & + \frac{I}{2} A_j \cdot (w_{j1} + w_{j3} + w_{j5} + w_{j7}) + \frac{I}{2} B_j \cdot (w_{j2} + w_{j4} + w_{j6} + w_{j8}) + \\ & + [D_{ij}^h + M_{ij}] \cdot w_{ij}^x - M_{ij} \end{aligned} \quad (9)$$

$$i, j = 1, \dots, N_{cp} \quad i \neq j$$

$$\begin{aligned}
d_{ij}^y \geq & \frac{1}{2} B_i \cdot (w_{i1} + w_{i3} + w_{i5} + w_{i7}) + \frac{1}{2} A_i \cdot (w_{i2} + w_{i4} + w_{i6} + w_{i8}) + \\
& + \frac{1}{2} B_j \cdot (w_{j1} + w_{j3} + w_{j5} + w_{j7}) + \frac{1}{2} B_j \cdot (w_{j2} + w_{j4} + w_{j6} + w_{j8}) + \\
& + [D_{ij}^l + M_{ij}] \cdot w_{ij}^y - M_{ij}
\end{aligned} \tag{10}$$

$i, j = 1, \dots, N_{cp} \quad i \neq j$

$$d_{ij}^z \geq \left[D_{ij}^y + \frac{1}{2} C_i + \frac{1}{2} C_j \right] \cdot w_{ij}^z \tag{11}$$

$i, j = 1, \dots, N_{cp} \quad i \neq j$

As Eq. (9), (10) e (11) atuam em conjunto com as Eq. (12), (13), (14), (15), (16) e (17).

- Eq. (12,13 e 14) - cálculo do limite máximo para as distâncias d_{ij}^x, d_{ij}^y e d_{ij}^z . Estas equações evitam a sobreposição de equipamentos. Quando uma posição relativa entre i e j está ativa, a distância oposta tem que ser zero, senão as distâncias calculadas pelas Eq. (15,16 e 17) poderiam ser tais que fariam as diferenças entre as posições centrais serem menores que o permitido.

$$d_{ij}^x \leq M \cdot (1 - w_{ji}^x) \tag{12}$$

$i, j = 1, \dots, N_{cp} \quad i \neq j$

$$d_{ij}^y \leq M \cdot (1 - w_{ji}^y) \tag{13}$$

$i, j = 1, \dots, N_{cp} \quad i \neq j$

$$d_{ij}^z \leq M \cdot (1 - w_{ji}^z) \tag{14}$$

$i, j = 1, \dots, N_{cp} \quad i \neq j$

- Eq. (15,16 e 17) - cálculo das diferenças entre as posições centrais entre pares de componentes i e j , a partir das distâncias d_{ij}^x, d_{ij}^y e d_{ij}^z . Nota-se que se d_{-ij} e d_{-ji} em qualquer direção forem ambas diferentes de zero, a diferença entre as posições centrais será a diferença entre as duas.

$$x_i - x_j - d_{ij}^x + d_{ji}^x = 0 \quad (15)$$

$$i = 1, \dots, N_{cp} - 1 \quad j = i + 1, \dots, N_{cp}$$

$$y_i - y_j - d_{ij}^y + d_{ji}^y = 0 \quad (16)$$

$$i = 1, \dots, N_{cp} - 1 \quad j = i + 1, \dots, N_{cp}$$

$$z_i - z_j - d_{ij}^z + d_{ji}^z = 0 \quad (17)$$

$$i = 1, \dots, N_{cp} - 1 \quad j = i + 1, \dots, N_{cp}$$

- Eq. (18,19 e 20) - cálculo das posições dos bocais de cada tubo, nas três coordenadas x , y e z , respectivamente:

$$x_p^n = x_i + F_{ji}^x \cdot \frac{1}{2} A_i \cdot (w_{i1} - w_{i3} + w_{i5} - w_{i7}) + F_{ji}^y \cdot \frac{1}{2} B_i \cdot (-w_{i2} + w_{i4} - w_{i6} + w_{i8}) \quad (18)$$

$$i = 1, \dots, N_{cp} \quad j = 1, \dots, N_{z_i} \quad p = j + \sum_{l=1}^{i-1} N_{z_l}$$

$$y_p^n = x_i + F_{ji}^y \cdot \frac{1}{2} B_i \cdot (w_{i1} - w_{i3} - w_{i5} + w_{i7}) + F_{ji}^x \cdot \frac{1}{2} A_i \cdot (w_{i2} - w_{i4} - w_{i6} + w_{i8}) \quad (19)$$

$$i = 1, \dots, N_{cp} \quad j = 1, \dots, N_{z_i} \quad p = j + \sum_{l=1}^{i-1} N_{z_l}$$

$$z_p^n = z_i + F_{ji}^z \cdot \frac{1}{2} C_i \quad (20)$$

$$i = 1, \dots, N_{cp} \quad j = 1, \dots, N_{z_i} \quad p = j +$$

$$\sum_{l=1}^{i-1} N_{z_l}$$

- Eq. (21,22 e 23) - cálculo dos comprimentos dos tubos a partir da posição dos bocais, nas três coordenadas x, y e z, respectivamente:

$$x_p^n - x_q^n - l_k^{x+} + l_k^{x-} = 0 \quad (21)$$

$$k = 1, \dots, N_{pi} \quad p = k_s(k) \quad q = k_t(k)$$

$$y_p^n - y_q^n - l_k^{y+} + l_k^{y-} = 0 \quad (22)$$

$$k = 1, \dots, N_{pi} \quad p = k_s(k) \quad q = k_t(k)$$

$$z_p^n - z_q^n - l_k^{z+} + l_k^{z-} = 0 \quad (23)$$

$$k = 1, \dots, N_{pi} \quad p = k_s(k) \quad q = k_t(k)$$

- Eq. (24) - cálculo da orientação dos componentes. Esta equação determina que apenas uma posição de rotação será escolhida para cada componente i:

$$\sum_{l=1}^8 w_{il} = 1 \quad (24)$$

$$i = 1, \dots, N_{cp}$$

- Eq. (25) - cálculo da posição relativa entre os componentes. Esta equação determina que apenas uma posição relativa será escolhida para cada par de componentes i e j:

$$w_{ij}^x + w_{ij}^y + w_{ij}^z + w_{ji}^x + w_{ji}^y + w_{ji}^z = 1 \quad (25)$$

$$i = 1, \dots, N_{cp} - 1 \quad j = i + 1, \dots, N_{cp}$$

- Eq. (26,27,28,29,30 e 31) - todas as variáveis citadas são não-negativas, isto é, maior ou igual a 0.

$$x, \quad y, \quad z \quad \geq \quad 0 \quad (26)$$

$$C_i^s \geq 0 \quad (27)$$

$$i = 1, \dots, N_{cp}$$

$$l_k^{x+}, l_k^{x-}, l_k^{y+}, l_k^{y-}, l_k^{z+}, l_k^{z-} \geq 0 \quad (28)$$

$$k = 1, \dots, N_{pi}$$

$$(29) \quad x_i, \quad y_i, \quad z_i \geq 0$$

$$i = 1, \dots, N_{cp}$$

$$x_p^n, y_p^n, z_p^n \geq 0 \quad (30)$$

$$p = 1, \dots, N_{nz}$$

$$d_{ij}^x, d_{ij}^y, d_{ij}^z \geq 0 \quad (31)$$

$$i, j = 1, \dots, N_{cp} \quad i \neq j$$

- Eq. (32 e33) – apresentam o domínio das variáveis binárias, relacionadas à rotação dos componentes e à posição relativa entre os componentes, respectivamente. Quando a variável assume valor 0 ela não existe e quando assume valor 1, existe.

$$w_{il} \in \{0,1\} \quad (32)$$

$$i = 1, \dots, N_{cp} \quad l = 1, \dots, 8$$

$$w_{ij}^x, w_{ij}^y, w_{ij}^z \in \{0,1\} \quad (33)$$

$$i, j = 1, \dots, N_{cp} \quad i \neq j$$

onde:

$$M_{ij} = \frac{1}{2} [\max \{A_i, B_i\} + \max \{A_j, B_j\}] \quad (38)$$

Neste modelo, os bocais sobre os componentes têm dois índices, um local para cada componente i ($j = 1, \dots, N_{z_i}$) e um outro global para todos os componentes

$$\left(p = j + \sum_{l=1}^{i-1} N_{z_l} \right).$$

Para utilização do modelo na indústria de papel, foram incluídas duas novas equações, onde são impostas restrições ao modelo as quais serão explicadas no capítulo 6, visto que com o aumento da quantidade de equipamentos aumenta-se a complexidade do problema. O modelo implementado em GAMS encontra-se no anexo 1.

Os problemas são modelados através da programação mista, inteira e linear (MILP), que são problemas lineares de otimização envolvendo variáveis discretas (inteiras) e contínuas.

A forma geral de um problema MILP (Mixed Integer Linear Programming) pode ser expressa como:

$$\text{Maximize } \sum_{j=1}^n c_j x_j ,$$

$$\text{Sujeito a } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i , \text{ para } i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\text{e } x_j \geq 0, \text{ para } j = 1, 2, \dots, n,$$

$$x_j \text{ é inteiro, para } j = 1, 2, \dots, I; I \leq n.$$

Os problemas MILP são lineares na função objetivo e nas restrições.

4.2. Otimização

A otimização é o processo de encontrar a melhor solução (ou solução ótima) de um conjunto de soluções para um problema. Existe um conjunto particular de problemas nos quais é decisiva a aplicação de um procedimento de otimização. Muitos processos podem se beneficiar de uma alocação otimizada de recursos. Esses recursos, que podem incluir capital, equipamentos, tarefas devem ser cuidadosamente alocados nas quantidades corretas, nos tempos corretos, e na seqüência correta para a obtenção do melhor resultado possível. São problemas complexos, muitas vezes de difícil solução, e que envolvem

significativas reduções de custos, melhorias de tempos de processos, ou uma melhor alocação de recursos em atividades (PARKER & RARDIN, 1988).

As técnicas de otimização devem ser utilizadas quando não existe uma solução simples e diretamente calculável para o problema. Isso geralmente ocorre quando a estrutura do problema é complexa, ou existem milhões de possíveis soluções. Nesses casos, é possível que não exista nenhum procedimento direto de solução, de forma que as técnicas de otimização podem ser utilizadas na busca pela melhor solução para o problema. Em alguns casos, quando nenhuma solução pode ser encontrada, o problema é "relaxado" (algumas restrições ou alternativas são descartadas), e a otimização pode ser utilizada para encontrar a solução ótima.

A otimização pode ser dividida em 2 classes: global e local. A otimização global encontra a melhor solução do conjunto de "todas" as soluções possíveis. A otimização local encontra a melhor solução dentro de um conjunto de soluções que está próximo a outro.

Na otimização local, a solução encontrada depende do ponto de início do processo de busca de otimização. A otimização global sempre encontrará a melhor solução possível, independentemente das condições de início do processo de busca, porém, geralmente, requisita um maior poder de computação.

Pode ser praticamente impossível de se encontrar uma "solução ótima global" em algumas aplicações, entretanto, uma "solução ótima local" pode ser bastante eficiente. Em muitos casos, encontrar o ótimo global não é necessário. Encontrar rapidamente uma "boa solução" (ótimo local) pode ser mais desejável do que encontrar demoradamente a melhor solução possível.

O tipo de otimização empregada depende da estrutura do problema e do grau de confiabilidade das variáveis utilizadas. Se todas as variáveis de decisão são reais, e a função objetivo e restrições são lineares, a programação linear, geralmente, é a melhor escolha. Entretanto, o mundo real usualmente requer funções não lineares, variáveis de valores discretos (ou inteiras), variáveis lógicas e restrições de diferentes naturezas aplicadas a esse gama de elementos.

Existem numerosas técnicas de otimização. A aplicação de cada uma delas depende essencialmente do tipo de problema. Sistemas baseados em regras são comumente usados em aplicações de controle, e envolvem regras pré-determinadas para gerar as

soluções. Programação linear e suas extensões são, via de regra, as melhores técnicas, e são amplamente utilizadas para otimização de objetivos globais. Redução de domínio e programação por restrições estão sendo combinadas em uma técnica relativamente nova aplicada diretamente a problemas de "scheduling". Algoritmos genéticos e recozimento simulado são duas recentes técnicas desenvolvidas que implementam soluções ao longo do tempo (fonte: iLab Sistemas Especialistas, 2004).

4.3. Modelagem e Simulação

Segundo LONA (2003), a modelagem e simulação são ferramentas poderosas na análise e síntese de um sistema. Um modelo é a descrição de objetos e processos envolvidos, que permite lidar com problemas complexos, de forma sistemática e eficiente. O modelo pode ser físico, gráfico e modelo matemático. O propósito do modelo determina sua seleção e/ou construção. A simulação permite a predição do comportamento de um sistema através da utilização do modelo desenvolvido.

As etapas na formulação de um modelo são:

- 1) Decisão acerca do tipo de modelo a ser usado e as considerações a serem feitas;
- 2) Formulação das equações utilizando considerações e hipóteses simplificadoras;
- 3) Obtenção dos dados requeridos e parâmetros do modelo;
- 4) Escolha de um método de resolução das equações e preparação de programas computacionais;
- 5) Ajuste do modelo à realidade e teste do mesmo.

As finalidades da Simulação de Processos são:

- 1) Predição do efeito de mudanças nas condições de operação, layout físico e capacidade de operação;
- 2) Balanço de massa e energia rápido - ferramenta de projeto e estudo da produção mensal de uma planta existente;
- 3) Otimização de operação de maneira rápida e eficiente;

- 4) Detecção e eliminação de falhas operacionais;
- 5) Promover um entendimento profundo acerca do completo comportamento do sistema;
- 6) Melhorar do controle e avaliação de novas ou melhores estratégias de controle;
- 7) Facilitar o cálculo de custos e o planejamento de operação;
- 8) Treinamento de operadores e engenheiros.

4.4. Modelos Matemáticos de Otimização

Um modelo matemático para um problema qualquer é um conjunto de relações matemáticas, isto é, equações, inequações e condições lógicas, que representam uma abstração do sistema real.

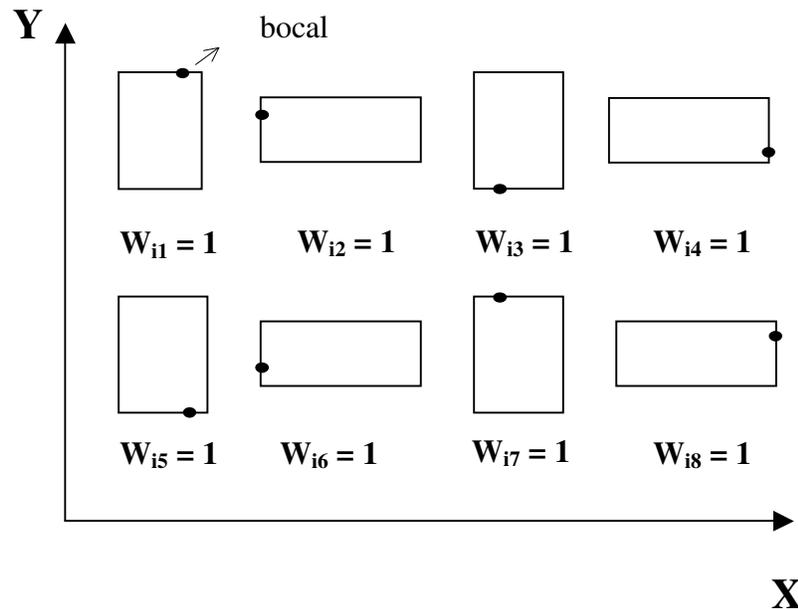
De acordo com RARDIN (1998), a programação matemática, também chamada de modelo de otimização, representa um problema de escolha que utiliza as variáveis de decisões, e busca de valores que maximizem ou minimizem a função objetivo composta pelas variáveis de decisões, sujeito às restrições em valores de variáveis, expressando os limites nas possibilidades de escolha da decisão.

O modelo matemático para um sistema consiste de quatro elementos básicos (variáveis, parâmetros, constantes e relações matemáticas). As variáveis podem assumir diferentes valores e suas especificações definem diferentes estados para um sistema. Em um modelo podem-se ter variáveis contínuas, inteiras ou um conjunto de mistura entre as duas. Os parâmetros são fixos por um ou múltiplos valores, e cada valor assumido define um novo modelo. As constantes são variáveis fixas, declarado no modelo. As relações matemáticas podem ser classificadas como equações, inequações ou condições lógicas.

O modelo utilizado neste trabalho permite diferentes rotações e orientações dos equipamentos (Figura 4.1), bem como diferentes posições relativas entre pares de componentes (em três dimensões). Essas rotações (orientações) e posições relativas são representadas no modelo por variáveis binárias inteiras (0 ou 1). A distância entre os equipamentos é dada de forma a considerar os percursos perpendiculares da tubulação

(como é o caso de uma planta química real). Dessa forma, o problema poderá ser colocado na forma de um modelo de programação mista, inteira e linear.

Figura 4.1 - As oito rotações possíveis no plano x-y



Fonte: GUIRARDELLO, 1993

A Figura 4.1 apresenta as posições possíveis dos bocais nos componentes, refletindo as diferentes rotações como se fossem reflexões de um espelho.

4.4.1. Formulação do problema

Segundo NIERDERBERGER (2004), esta é a etapa crucial na resolução de um problema que envolve otimização. Consiste na identificação de elementos essenciais na descrição verbal ou conceitual de uma determinada situação, e organizá-los numa determinada forma matemática, envolvendo:

1. A função objetivo;
2. O modelo do processo (restrições);

A função objetivo representa lucro, custo, energia, rendimento, etc, em termos das variáveis chaves do processo em análise. O modelo do processo e as restrições descrevem as inter-relações entre as variáveis chaves.

Uma grande variedade de problemas no projeto, construção, operação e análise de plantas químicas (bem como muitos outros processos industriais) pode ser resolvida por otimização.

Os problemas típicos no projeto e na operação de unidades de processamento químico apresentam multiplicidade de soluções. O papel da otimização é ajudar a selecionar a melhor solução de todo o conjunto, através de métodos quantitativos eficientes.

O uso de computadores, com programas específicos viabiliza esse procedimento a um custo aceitável. No entanto, antes que um engenheiro possa obter informações úteis, é necessário:

1. Efetuar uma análise crítica do processo, ou do projeto.
2. Determinar claramente o que se deseja.
3. Avaliar o problema à luz de experiências passadas e aplicar o bom senso.

Por que os engenheiros têm interesse na otimização? Um engenheiro trabalha para aperfeiçoar o projeto inicial do equipamento, e persegue incrementos na operação do equipamento, com o objetivo de aumentar a produtividade, maximizar os lucros e minimizar o consumo de energia, por exemplo. Em unidades industriais, os benefícios provêm da melhoria no desempenho da planta, com aumento nos rendimentos de produtos de alto valor agregado ou redução nos contaminantes, processando quantidades maiores com menor consumo de energia e aumentando o tempo entre as paradas. A otimização pode também levar à redução nos custos de manutenção, menor desgaste nos equipamentos e melhor utilização de pessoal.

Além disso, benefícios intangíveis surgem da interação entre operadores, engenheiros e gerentes. A otimização pode se dar em vários níveis numa companhia, indo de uma complexa combinação de plantas e distribuição de infra-estrutura até plantas individuais, combinação de unidades, equipamentos individuais, subsistemas de um dado equipamento e unidades menores ainda. Em todos esses níveis ocorrem problemas que podem ser resolvidos por otimização.

Portanto, o escopo de um problema de otimização pode ser uma companhia inteira, uma planta composta de várias unidades, uma unidade de processo, uma única operação unitária, um simples equipamento nesta operação, ou qualquer sistema intermediário entre esses. Geralmente, numa companhia industrial típica, existem três áreas (níveis) onde se emprega a otimização: administração, projeto de processos e especificação de equipamentos e operação das unidades.

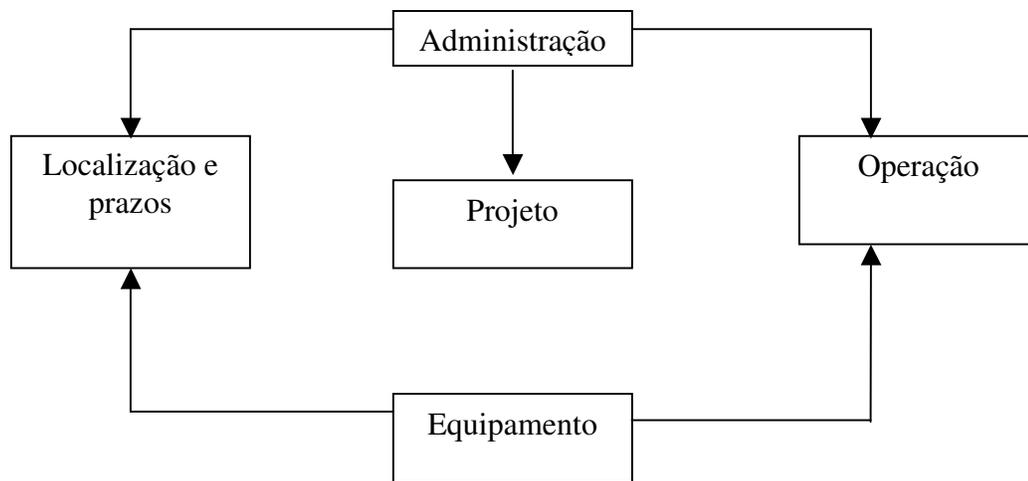


Figura 4.2 - Níveis empregados na otimização da área industrial

A administração toma decisões a respeito de implementação do projeto, seleção do produto, orçamento, investimentos em vendas versus pesquisa e desenvolvimento, construção de novas plantas. Em geral, a magnitude da função objetivo para otimização, se medida em unidades monetárias, é muito maior no nível administrativo do que nos outros dois.

As pessoas envolvidas no projeto de processos e especificação de equipamentos se preocupam com a seleção de um processo e respectivas condições operacionais. É mais adequado um processo em batelada ou contínuo? Quantos reatores devem-se usar num determinado processo petroquímico? Qual deve ser a configuração da planta e como dispomos os processos de modo que a eficiência operacional da planta esteja no máximo? Qual é a dimensão ótima de uma unidade, ou de uma combinação de unidades?

A terceira classe de problemas de otimização ocorre numa escala de tempo totalmente diferente das outras duas. Projeto de processo e especificação de equipamentos são efetuados pouco antes da implementação do empreendimento. As decisões administrativas de implementar os projetos são tomadas muito antes da etapa de projeto. Por outro lado, a otimização de condições operacionais é feita mensalmente, semanalmente, diariamente, ou até mesmo a cada minuto. A otimização da operação de uma planta determina os setpoints dos controladores de cada unidade, em valores de temperaturas, pressões, vazões, etc., que formam o conjunto ótimo num dado instante. Por exemplo: a seleção do percentual de ar em excesso numa caldeira é bastante crítica, e envolve um balanço da razão combustível-ar para garantir combustão completa e, ao mesmo tempo, fazer uso máximo do potencial de aquecimento do combustível.

A otimização típica do dia-a-dia em uma planta química minimiza o consumo de vapor ou de água de resfriamento, determina a melhor razão de refluxo numa coluna de destilação ou mostra a localização econômica das matérias-primas.

Algumas situações típicas para a aplicação da otimização:

- 1- Vendas limitadas pela produção: o mercado pode absorver uma quantidade maior que a capacidade de produção. Frequentemente, um aumento na produção pode ser obtido apenas com pequenas mudanças nos custos operacionais (matérias-primas, utilidades) e sem mudanças nos custos de investimento. Esta situação implica numa elevada margem de lucro nas vendas adicionais;
- 2- Vendas limitadas pelo mercado: a esta situação só se deve aplicar a otimização se for possível aumentar a eficiência ou produtividade. Nesse caso, há menos incentivo econômico para implementação do que no caso anterior porque não há produção adicional. O objetivo principal é a redução dos custos de produção (otimização do uso de utilidades e matérias-primas);
- 3- Capacidades de produção elevadas: oferecem grande potencial para aumento de lucros porque pequenas economias nos custos de produção são grandemente magnificadas. O processamento de petróleo e vários processos químicos se enquadram nesta classe;
- 4- Altos consumos de matéria-prima ou energia: economias significativas podem ser obtidas através da redução no consumo destes itens, se eles têm alto valor agregado;

5- A qualidade do produto excede as especificações: neste caso, os custos de produção são maiores do que o necessário e há desperdício de capacidade. Operando em condições que garantam a especificação mínima, obtém-se redução nos custos;

6- Perda de componentes valiosos em correntes descartadas: a análise dessas correntes indica se materiais valiosos estão sendo perdidos. Ajuste da razão ar/combustível em fornos minimiza emissão de hidrocarbonetos e reduz o consumo de combustível;

7- Altos custos de mão-de-obra: em processos onde é necessária manipulação excessiva, como operações em batelada, freqüentemente os materiais podem ser manipulados a custos menores e empregando menos mão-de-obra. A revisão do layout das instalações pode reduzir custos.

Alguns exemplos:

Aplicações:

1. Determinação do melhor local para a instalação da planta;
2. Itinerário de navios e carros-tanque para a distribuição de petróleo e derivados;
3. Dimensionamento e layout de tubulações (oleodutos, gasodutos, polidutos);
4. Projeto de equipamentos e de plantas completas;
5. Programação de manutenção e substituição de equipamentos;
6. Operação de equipamentos: reatores, colunas, etc;
7. Avaliação de dados da planta para a confecção de um modelo do processo;
8. Minimização de estoques;
9. Alocação e distribuição de recursos e serviços entre vários processos;
10. Planejamento e programação da construção.

4.5. Algoritmo

De um modo informal, um algoritmo é um procedimento computacional bem definido que toma como parâmetros de entrada um valor (ou um conjunto de valores) e que produz como saída um valor (ou um conjunto de valores). Ou seja, é uma seqüência de passos computacionais que transformam um input num output.

Sob um outro ponto de vista um algoritmo é uma ferramenta que permite resolver um problema computacional específico. O algoritmo descreve o processo computacional que permite resolver esse problema (SHAHBAZKIA, 2001).

4.6.Branch – and –Bound

4.6.1. Conceitos

O princípio do Branch and Bound (BB) é a enumeração de todas as soluções viáveis de um problema de otimização combinatorial, diga-se um problema de minimização, tal que propriedades ou atributos não compartilhados por qualquer solução ótima são detectados tão cedo quanto possível. Um atributo (ou ramo da árvore de enumeração) define um subconjunto do conjunto de todas as soluções viáveis do problema original, no qual cada elemento do subconjunto satisfaz este atributo, segundo BLAZEWICZ et al (1996).

O método Branch and Bound é um algoritmo que busca por uma solução ótima através do exame de somente uma pequena parte do número total de possíveis soluções. Ele trabalha quebrando o espaço de soluções viáveis em subproblemas menores até que uma solução ótima seja alcançada. Para cada subproblema gerado o custo total ou lucro é calculado. Subproblemas com pior custo ou lucro são descartados até que não se possam criar mais subproblemas RENDER et al (1997).

Ele varre uma árvore na qual cada nó representa um subproblema do problema inicial na intenção de achar o caminho da raiz até uma folha com o menor custo, ou seja, para esse algoritmo, encontrar a solução não é o fim, ele precisa saber qual solução tem o menor esforço. Sabendo disso, ele pode dar o direito de dispensar alguns caminhos que o levarão a uma solução, desde que ele saiba que essa solução certamente será mais custosa do que uma outra solução já encontrada previamente.

A cada nó ele calcula se esse esforço já for maior que o esforço para se chegar a pelo menos uma das soluções já encontradas, esse caminho até a folha é abandonado. Esse algoritmo trabalha com esforços não negativos. Esta técnica consiste em um método

enumerativo: em cada nó escolhem-se uma variável e gera-se duas sub-árvores, uma com esta variável valendo 0 e outra valendo 1. Entretanto, em cada nó calcula-se os limites inferiores e superiores que a função objetivo pode atingir, guardando sempre o melhor limite superior encontrado. Se o limite inferior de um certo nó for maior que o melhor limite superior, não precisamos prosseguir nesta árvore, ela não possui a solução ótima, já que o melhor que se pode obter por ela é pior que a solução de outra sub-árvore. Bons limites inferiores e superiores garantem uma grande redução no número de nós pesquisados, viabilizando a solução de instâncias maiores.

O Branch-and-Bound executa uma procura em profundidade (explora os vizinhos “filhos” antes dos vizinhos “irmãos”), e ao atingir a primeira solução completa, guarda a sua valoração como sendo a melhor valoração obtida até então. Dessa forma, pode cortar todo um ramo da árvore, no caso de atingir uma solução parcial com valoração igual ou pior à melhor valoração encontrada. O algoritmo finaliza quando todos os estados tiverem sido analisados direta ou indiretamente, ou ter sido excedido algo, tipicamente um limite de tempo, retornando nesse caso a melhor solução completa analisada.

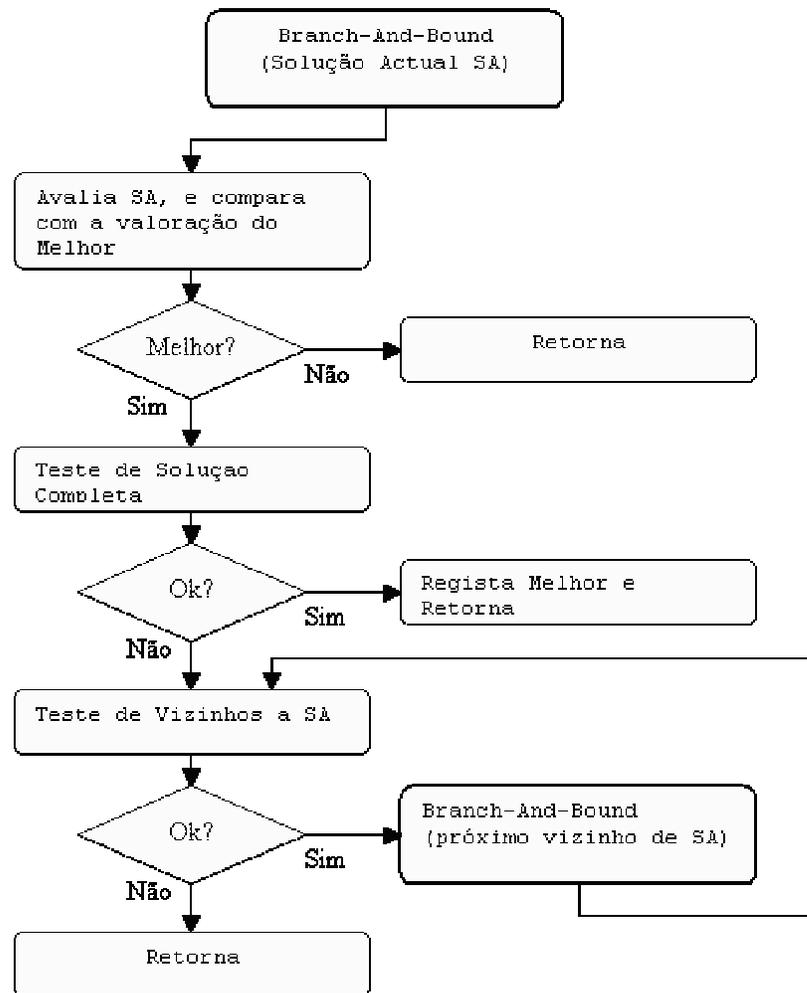


Figura 4.3 - Fluxograma do Branch-and-Bound.

O termo Branch and Bound refere-se a todos os métodos de busca no espaço de estados na qual todas as crianças do E-node (nó expandido) são gerados antes que qualquer outro nó vivo possa se tornar o E-node. A técnica Branch and Bound trabalha basicamente usando uma das duas estratégias, busca em largura (BFS) ou busca em profundidade (D-search). Na terminologia BB, uma busca BFS será chamada busca FIFO (primeiro que entra primeiro que sai) porque a lista de nós vivos é uma fila. Uma busca D-search será chamada busca LIFO (último que entra primeiro que sai) porque a lista de nós vivos é uma pilha. Como no caso de backtracking, funções de limitação (bounding functions) são usadas para ajudar a evitar a geração de sub-árvores que não contém um nó resposta HOROWITZ et al (1998).

BLAZEWICZ et al (1996) resumiram o significado do Branch and Bound. Branching (ou ramificação) é o procedimento de particionar um problema grande em dois ou mais subproblemas, geralmente, mutuamente excludentes. Bounding (ou poda) calcula um limite inferior para o valor da solução ótima para cada subproblema gerado no processo de branching. Um nó pode ser eliminado não somente baseado no limite inferior, mas também por meio do chamado critério de eliminação proporcionado por propriedades de dominância ou condições de viabilidade desenvolvidas para um dado problema. A escolha de um nó a partir do conjunto de nós gerados, que tenham até então, nem sido eliminado, nem levaram a ramificação é resultado da estratégia de busca adotada.

Duas estratégias são adotadas freqüentemente: jumtracking e backtracking. Jumtracking implementa a busca em largura, no qual um nó com o mínimo limite inferior é selecionado para examinação. Backtracking implementa a busca em profundidade, no qual os nós descendentes de um nó pai são examinados em uma ordem arbitrária ou em ordem de limites inferiores não-decrescentes.

Na estratégia de jumtracking, o processo de ramificação salta de um ramo para outro na árvore de busca. Na estratégia backtracking, ele primeiro prossegue até o nível mais baixo por algum caminho para encontrar uma solução tentativa e então refaz aquele caminho para cima até o primeiro nível com nós ativos e assim por diante. É fácil notar que jumtracking tende a construir uma grande lista de nós ativos, enquanto backtracking mantém relativamente uns poucos nós na lista a qualquer momento. Embora, uma vantagem do jumtracking é a qualidade de suas soluções tentativas, que são geralmente muito mais próximas do ótimo do que soluções geradas por backtracking, especialmente nos estágios iniciais da busca.

Estas duas estratégias, jumtracking, e backtracking são conhecidas como BFS e D-search respectivamente. Para construir-se um algoritmo de branch and bound para um dado problema, deve-se decidir sobre:

- i. O procedimento de ramificação e a estratégia de busca;
- ii. O procedimento de limitação ou critério de eliminação.

Algoritmos de backtracking determinam soluções pela busca sistemática no espaço de soluções para uma dada instância do problema. Usar uma organização em árvore para o espaço de soluções facilita a busca. Cada nó nesta árvore define um estado do problema. Todos os caminhos da raiz para outros nós definem o espaço de estados do problema. Estados soluções (s) são aqueles estados do problema para o qual o caminho da raiz até s define uma tupla que é um membro do conjunto de soluções (ele satisfaz as restrições implícitas) do problema. A organização em árvore do espaço de soluções é referida como árvore do espaço de estados.

Em muitas aplicações do método backtrack, a solução desejada é expressa como uma n -tuple (x_1, \dots, x_n) , em que x_i são escolhidos do conjunto finito S_i . Frequentemente, o problema a ser resolvido determina que se encontre um vetor que maximize (ou minimize, ou satisfaça) uma função critério $P(x_1, \dots, x_n)$. Algumas vezes ele procura por todos os vetores que satisfazem P .

Muitos problemas que são resolvidos usando-se backtracking requerem que todas as soluções satisfaçam um conjunto complexo de restrições. Para qualquer problema estas restrições podem ser divididas em duas categorias: explícitas e implícitas.

Restrições explícitas são regras que restringem cada x_i a somente tomarem valores de um dado conjunto. Elas dependem da instância particular I do problema sendo resolvido. Todas as tuplas que satisfazem as restrições explícitas definem um possível espaço de soluções para I .

As restrições implícitas são regras que determinam quais das tuplas no espaço de soluções de I satisfazem a função critério. Logo, restrições implícitas descrevem a maneira pela qual os x_i devem relacionar-se uns aos outros.

A idéia básica do algoritmo de backtracking é construir o vetor solução inserindo um componente de cada vez e usar funções critério modificadas $P_i(x_1, \dots, x_i)$ (algumas vezes chamadas funções de poda) para testar se o vetor sendo formado tem alguma chance de sucesso. A maior vantagem deste método é que se percebido que o vetor parcial (x_1, x_2, \dots, x_i) não pode de forma alguma levar a uma solução ótima, então, m_{i+1}, \dots, m_n possíveis vetores podem ser ignorados inteiramente.

4.6.2 Como Branch and Bound funciona

HOROWITZ et al (1997) consideram que a formulação do processo de backtracking pode ser apresentada como segue. Deixe (x_1, x_2, \dots, x_i) ser um caminho da raiz até um nó na árvore de espaço de estados. Deixe $T(x_1, x_2, \dots, x_i)$ ser o conjunto de todos os possíveis valores de x_{i+1} tal que $(x_1, x_2, \dots, x_{i+1})$ é também um caminho para um estado do problema. $T(x_1, x_2, \dots, x_n) = \phi$. É assumida a existência de uma função de poda B_{i+1} (expressa como predicados) tal que se $B_{i+1}(x_1, x_2, \dots, x_{i+1})$ do nó raiz ao estado do problema, então o caminho não pode ser estendido para alcançar-se um nó resposta. Logo, os candidatos para a posição $i+1$ do vetor solução (x_1, \dots, x_n) são aqueles valores que são gerados por T e satisfazem B_{i+1} .

RENDER et al (1997) apresentam seis passos simples para resolver problemas de maximização em programação inteira através de branch and bound, que foram modificados e apresentados aqui para problemas de minimização:

1. Resolver o problema original usando programação linear. Se a resposta satisfaz a restrição inteira, esta é a solução, pare. Se não, estes valores proporcionam um limite inferior inicial;
2. Encontrar qualquer solução viável que preenche a restrição inteira para uso como um limite superior. Usualmente, arredondar cada valor de variável realizará isso;
3. Ramificar a variável do passo 1 que não tenha um valor inteiro. Dividir o problema em dois subproblemas baseados nos valores inteiros que estão imediatamente abaixo ou acima do valor não inteiro;
4. Criar nós no topo desses novos ramos pela solução dos novos problemas;
5. A) Se um ramo leva a uma solução inviável por programação linear, descarte o nó;
B) Se um ramo leva a uma solução viável por programação linear, mas não uma solução inteira vá para o passo 6;
C) Se o ramo leva a uma solução inteira viável, examine o valor da função objetivo. Se este valor é igual ao limite inferior, uma solução ótima foi alcançada. Se ele não é igual ao limite inferior, mas ele é menor que o limite superior, adote-o como um novo limite

superior e vá para o passo 6. Finalmente, se ele é maior que o limite superior, descarte esse ramo;

6. Examine ambos os ramos novamente e adote como limite superior o valor máximo da função objetivo para todos os nós finais. Se o limite inferior é igual ao limite superior, pare. Se não, volte ao passo 3.

4.6.3. Upper e Lower Bounds

A análise do algoritmo fornece um limite superior (upper bound) para a quantidade de recursos que é suficiente para resolver um problema. Para saber se e quanto pode-se melhorar este algoritmo, no entanto, precisa-se estabelecer um limite inferior (lower bound) na quantidade de recursos necessários, ou seja, qual a quantidade mínima necessária de recursos para resolução do problema.

Naturalmente, tem-se o interesse em estabelecer o maior limite inferior e, analogamente, o menor limite superior possível. Idealmente, os dois limites, inferior e superior, deveriam ser iguais, pois neste caso conheceríamos exatamente a quantidade de recursos que é tanto necessária quanto suficiente para resolver um problema.

Se dispusermos de um algoritmo que utilize exatamente esta quantidade de recursos, então, teremos um algoritmo ótimo para a tarefa, no sentido de que a quantidade de recursos utilizada por qualquer outro algoritmo para a tarefa será maior ou no melhor caso igual à do algoritmo que temos. A diferença entre o limite inferior e o superior nos dá uma medida de quanto um algoritmo pode ser melhorado. Nem sempre, no entanto, é possível se construir algoritmos ótimos.

4.6.4. Vantagens e Desvantagens

AVRIEL (1996) afirma que técnicas Branch and Bound (B&B) podem ser considerados de diferentes formas como, por exemplo, enumeração implícita, avaliação e separação progressiva na árvore de busca, particionamento estratégico e corte provisional. B&B tem duas qualidades principais que diferenciam estas técnicas de outras. Primeiro,

elas podem ser aplicadas a problemas de programação inteira mista, essencialmente da mesma maneira que elas podem ser aplicadas a problemas de programação inteira pura. Segundo, elas tipicamente encaminham uma sucessão de soluções inteiras viáveis, dessa forma, garantindo a melhor solução à mão como uma candidata à ótima, mesmo quando o tempo computacional for muito grande.

Métodos B&B podem ser customizados para explorar determinadas estruturas do problema, permitindo que estas estruturas sejam manuseadas com maior eficiência e reduzida alocação de memória. De fato, exceto em termos muito gerais, não existe um método B&B, mas uma coleção deles que dividem um número de características comuns.

Considerando-se especificamente a estratégia de backtracking em B&B, HOROWITZ et al. (1997) afirmam que dois tipos de algoritmos são geralmente encontrados. Backtracking pode ser, recursivo ou geral. As vantagens de cada um devem ser analisadas considerando-se os quatro fatores descritos a seguir:

1. O tempo para gerar o próximo nó;
2. O número de nós que satisfazem as restrições explícitas;
3. O tempo para as funções de poda;
4. O número de nós que satisfazem as funções de poda.

A importância do backtracking reside na sua habilidade para resolver algumas instâncias de problemas num pequeno espaço de tempo. A única dificuldade está em prever o comportamento de um algoritmo backtracking para a instância do problema sendo resolvida.

4.7. Metodologia da utilização da programação matemática

A maioria dos pacotes computacionais para resolução de problemas utilizando programação matemática limita-se a resolução de um ou dois tipos de problemas de programação, como, por exemplo: o MATHCAD e MATHLAB que podem ser utilizados na resolução de problemas de PL e PNL; o pacote LINDO, para problemas de PL e PLIM; sendo raros os pacotes que conseguem resolver os problemas que envolvem a PNLIM.

Para implementação e resolução dos problemas de programação matemática, torna-se necessária à escolha de um “software” eficiente e de fácil aprendizado. Neste caso optou-se pelo uso do GAMS (General Algebraic Model System, BROOK et al., 1988).

4.8. Software GAMS

O Software GAMS (General Algebraic Modeling System) é designado à construção e solução de grandes e complexos modelos de programação matemática, oferecendo recursos poderosos para programadores e sendo mais compreensível para usuários de modelos de outras disciplinas. Podendo fazer declarações de modelos algébricos de forma concisa numa linguagem que é facilmente lida tanto por modeladores quanto por computadores. Assim, o Software GAMS pode melhorar substancialmente a produtividade de modeladores e expandir a extensão e utilidade de programação de aplicações matemáticas em análise de plano de ação e tomada de decisões SOLETTI & CARVALHO (1999).

O objetivo de desenvolver o GAMS surgiu de experiências frustradas de um grupo de modeladores econômicos do Banco Mundial. Os programadores deste grupo escreviam seus programas em FORTRAN para preparar cada modelo para a solução, o trabalho era árduo e erros eram fáceis de serem cometidos e difíceis de serem encontrados. O programador do modelo era a única pessoa que sabia exatamente como ele funcionava. E ainda, se um programador desistia, levava meses para o sucessor dominar o modelo. Os Modelos eram difíceis e caros para serem mudados, especialmente se a mudança não havia sido prevista e planejada. Em apresentações de seminários, os modeladores tinham que defender as versões existentes de seus modelos quase que irracionalmente, porque o tempo e o dinheiro necessários para fazer as modificações propostas eram proibitivos. Desta forma, o GAMS foi projetado para mudar esta situação, produzindo um sistema de estrutura e linguagem de programação no qual expressões concisas, generalizações e portabilidade são facilmente mantidas e o computador é utilizado também para rastrear erros e detalhes de programação. O pacote computacional GAMS, além de ser capaz de resolver todos os tipos de problemas de programação matemática, é de fácil utilização e permite ao usuário a escolha de diferentes métodos sem necessitar alterar a estrutura do modelo. Uma outra

vantagem a ser considerada é a interface “software” - usuário que utiliza uma estrutura de programação muito semelhante à forma como as equações são usualmente escritas. Além disso, o pacote permite a utilização de diferentes métodos de resolução programados nos mais diversos pacotes comerciais disponíveis (MINOS, CONOPT, OSL, XA, ZOOM, entre outro), para os diferentes problemas, sem que se altere a formulação do modelo.

Descrição dos comandos principais usados em GAMS(BROOKE et al., 1988; TIN-LOI, 1995):

•**SETS**: - correspondem exatamente aos índices nas representações algébricas dos modelos, aos quais podem ser atribuídos números ou nomes.

Por exemplo:

SETS

N nomes dos componentes /destil, tqref, referv, cond12, bbr12, bbov12/.

I números dos componentes / 1, 2, 3, 4, 5, 6 /.



J números dos componentes / 1 * 6 / ;

declaração

texto explicativo

atribuição

finalização do "SET"

(opcional) (se for uma seqüência),

(I pode ser escrito como J)

Outro comando muito útil é o ALIAS que permite definir outro índice, cujos elementos são iguais ao índice já declarado. Por exemplo, o índice I é exatamente igual ao índice J:

SET I números dos componentes / 1 * 6 / ;

ALIAS (I, J);

Além deste comando, as funções de transferência CARD e ORD podem ser usadas com os sets. CARD retorna o número de elementos em um set, enquanto que ORD, a posição relativa do elemento.

- **DADOS**

A entrada de dados pode ser feita na forma de:

- listas (parâmetros e escalares);
- tabelas;
- atribuições diretas.

Os parâmetros são definidos de forma semelhante aos índices (sets), sendo compostos por constantes e podendo ser um escalar, um vetor ou uma matriz de duas ou mais dimensões. No entanto, os escalares são empregados para elementos simples.

As tabelas são usadas para atribuição das estruturas de dados bidimensionais ou de dimensões superiores.

As atribuições diretas diferem das listas e tabelas, pois apresentam as expressões e cálculos separadamente.

Por exemplo:

$$\text{AREA(I)} = \text{A(I)} * \text{B(I)} ;$$

$$\text{CSA(I,K)} = \text{AREA(I)} * 62.8765 ;$$

- **VARIÁVEIS:** - usadas para declarar as variáveis de decisão para o modelo. Podem ser de cinco tipos diferentes, sendo que um tipo (FREE) é atribuído somente quando este não for especificado. Os tipos de variáveis e os intervalos compreendidos para cada um são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Tipos de variáveis e seus respectivos intervalos.

Tipo de Variável	Intervalo permitido
Livre (Free)	$-\infty$ a $+\infty$
Positiva (Positive)	0 a $+\infty$
Negativa (Negative)	$-\infty$ a 0
Binária (Binary)	0 ou 1
Inteira (Integer)	0, 1, 100.

Fonte: BROOKE et al., 1988.

Embora os valores não possam ser inicializados na declaração das variáveis, campos adicionais podem ser usados para especificar os limites inferiores (.LO) e limites superiores (.UP), entre outros.

• EQUAÇÕES

As equações e desigualdades formam a essência dos modelos de otimização.

Em GAMS, coloca-se, seqüencialmente, o nome da equação a ser definida, o domínio, ponto - ponto e a expressão relacionada com um operador (menor ou igual "=L=", igual "=E=", ou ainda, maior ou igual "=G=").

A equação indexada gera, automaticamente, um grande número de equações de restrição. Logo, é necessário muita atenção na declaração, para evitar a geração desnecessária destas equações que, conseqüentemente, torna o programa mais lento em sua resolução, além de ocupar mais memória no computador.

Por exemplo:

EQUATION

EQ01(I) cálculo da dimensão x do "layout";

EQ01(I) .. XX =G= X(I) + 0.5*A(I)*(W(I,"1")+W(I,"3")+W(I,"5")+W(I,"7"))
+ 0.5*B(I)*(W(I,"2")+W(I,"4")+W(I,"6")+W(I,"8"));

Primeiramente, foi realizada a declaração da equação e, logo em seguida, a sua definição. No exemplo acima, a equação é indexada apenas por I, logo, o número de equações de restrição a ser gerado é exatamente igual ao número de elementos declarados no "SET I".

- **FUNÇÃO OBJETIVO**

Não há comandos específicos para declarar a função objetivo em GAMS, no entanto, convém que esta seja a primeira equação a ser definida, sua variável seja livre (sem restrições de tipo), sem domínio (índices) e, ainda, a equação seja uma igualdade.

- **MODELO E RESOLUÇÃO**

Para identificar e resolver o conjunto de equações, após a sua declaração e definição, emprega-se a palavra `model` precedido do nome do modelo e, entre barras, os nomes das equações ou simplesmente `all`, que inclui todas de uma só vez.

Por exemplo:

MODEL layout /ALL/ ;

ou

MODEL layout / OBJ, SUP, EQ01, EQ02, EQ03 / ;

Para chamar o solver, bem como para explicitar o tipo de otimização desejada, deve-se observar o seguinte procedimento:

- 1) Empregar a palavra `SOLVE`
- 2) Escrever o nome do modelo a ser resolvido
- 3) Escrever `USING`
- 4) Escolher um procedimento de solução, isto é:

- LP para programação linear

- NLP para programação não linear
- MIP para programação inteira mista
- RMIP para programação inteira mista relaxada

5) Escrever **MINIMIZING** ou **MAXIMIZING** para minimizar ou maximizar a função objetivo e o nome da variável a ser otimizada.

Por exemplo:

SOLVE LAYOUT USING MIP MINIMIZING T ;

Em que T é a variável livre que determina a função objetivo.

Existe ainda a possibilidade de se escolher o solver através do comando **OPTION**.

Assim,

MODEL LAYOUT /ALL/ ;

OPTION MIP = CPLEX ;

SOLVE LAYOUT USING MIP MINIMIZING T ;

SAÍDA DOS RESULTADOS

Para visualizar as variáveis, parâmetros ou escalares desejados, basta empregar o comando **DISPLAY**.

Ex.: **DISPLAY XX.L, YY.L, ZZ.L;**

EXECUÇÃO

Para executar os programas em GAMS, basta digitar a palavra **gams** precedida do nome do arquivo.

Ex.: **gams layout**

SOLVERS

Existem diversos solvers para resolver os problemas em MILP, porém, neste trabalho é empregado o solver CPLEX, que utiliza o algoritmo Branch and Bound (B&B).

CAPÍTULO 5

OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DOS COMPONENTES NA FABRICAÇÃO DE PAPEL TISSUE

O modelo descrito no item 4.1 foi implementado em GAMS para a otimização do posicionamento dos componentes (circuito de massa) na fabricação de papel Tissue

5.1. Planta de fabricação de papel Tissue

A planta de fabricação de papel Tissue é composta de 15 principais equipamentos conforme apresentado na tabela 04, sua disposição segue apresentada na figura 04.

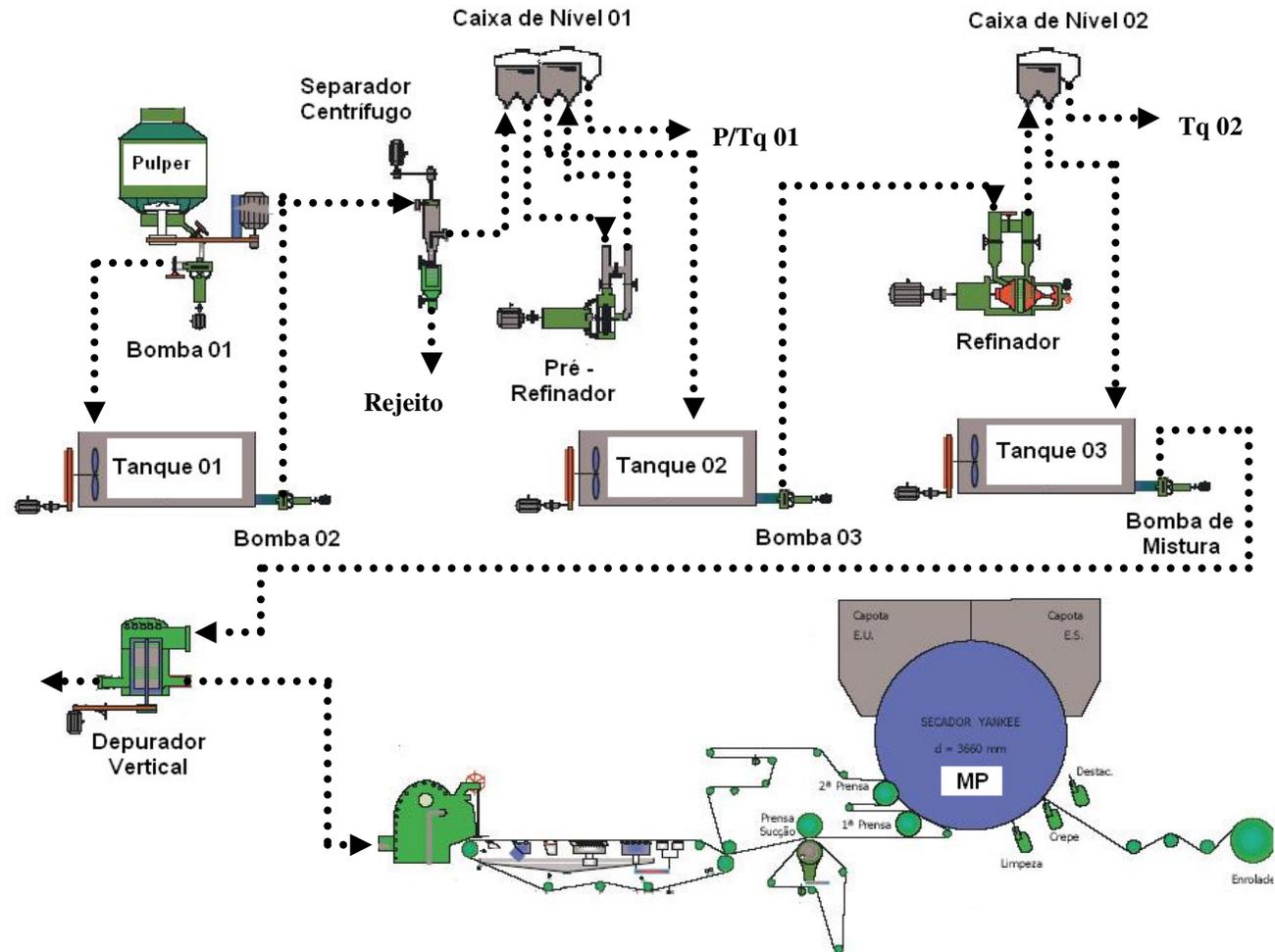


Figura 5.1 - Unidade de fabricação de papel Tissue com quinze componentes principais.

Tabela 5.1 - Os quinze principais equipamentos para fabricação de papel Tissue.

EQUIPAMENTO	NOME
1	Pulper ou Desagregador
2	Bomba 01
3	Tanque 01
4	Bomba 02
5	Separador Centrífugo
6	Caixa de Nível 01
7	Pré – Refinador
8	Tanque 02
9	Bomba 03
10	Refinador
11	Caixa de Nível 02
12	Tanque de Diluição
13	Bomba de Mistura
14	Depurador Vertical
15	Máquina de Papel

5.2.Dados para o caso de estudo

Todos os valores utilizados para a realização deste trabalho são dados reais e foram obtidos mediante pesquisa à literatura, bem como em contato com os fabricantes dos equipamentos necessários para a fabricação de papel, a fonte de alguns dados necessários para realização deste trabalho foi omitida por motivo de sigilo industrial.

O fluxograma utilizado para o estudo de caso foi referente ao circuito de massa, visto que este é comum a qualquer fábrica de papel. O fluxograma do circuito de água não foi incluído neste trabalho, pois é diferente dependendo das necessidades de recuperação de água para cada fábrica.

Foi também objeto de estudo deste trabalho a avaliação dos resultados realizados por GUIRARDELLO (1993) e PISSINATTO (2001), para melhor demonstrar os resultados obtidos pela utilização do pacote GAMS juntamente com o solver CPLEX 7.5.

Nas tabelas seguintes, são apresentados os dados utilizados na modelagem do problema, referentes às dimensões dos componentes, às distâncias mínimas horizontais e verticais de segurança que devem existir entre os equipamentos e aos dados sobre bocais e tubos.

Tabela 5.2 - Dimensões dos equipamentos na fabricação de papel Tissue.

Equipamento	Largura (m)	Comprimento (m)	Altura (m)
	A	B	C
Pulper	3.0	3.0	5.5
Bomba 01	1.0	1.75	1.0
Tanque 01	4.0	6.5	5.5
Bomba 02	0.8	1.4	0.8
Separador Centrífugo	0.5	0.45	1.5
Caixa de Nível 01	0.5	1.9	0.9
Pré Refinador	0.8	2.1	1.3
Tanque 02	3.0	4.5	5.5
Bomba 03	0.5	1.35	1.0
Refinador	1.2	3.3	1.3
Caixa de Nível 02	0.5	1.1	0.9
Tanque de Diluição	2.0	2.5	5.5
Bomba de Mistura	1.4	3.0	1.4
Depurador Vertical	1.6	2.0	2.5
MP	3.3	21.5	5.5

5.2.1. Distâncias mínimas de segurança

As distâncias mínimas de segurança entre os componentes são determinadas para cada caso específico. Quando isto não é possível, essas distâncias podem ser estimadas a partir de tabelas disponíveis na literatura (PISSINATO, 2001).

Essa informação pode ser apresentada como uma distância mínima entre pares de equipamentos (ANDERSON, 1982; BUSH & WELLS, 1972; KAURA, 1980; MECKLENBURGH, 1985), ou como uma distância mínima em torno de cada equipamento (BUSH & WELLS, 1972; KAURA, 1980; MECKLENBURGH, 1985).Tabela

5.3 - Distâncias horizontais mínimas de segurança entre os equipamentos na fabricação de papel Tissue.

Distâncias Horizontais de Segurança entre os Equipamentos (m)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		1	2.5	2.0	1.5	2.0	2.0	2.5	2.0	3.0	3.0	2.5	2.0	2.5	3.0
2	1		3.0	2.0	1.0	2.5	2.0	2.0	2.5	2.0	3.0	2.0	2.5	2.5	3.0
3	2.5	3.0		1.0	1.0	2.5	2.5	2.0	2.5	2.0	3.0	2.0	2.5	2.5	3.0
4	2.0	2.0	1.0		1.5	2.0	2.5	1.5	2.0	1.5	2.0	2.0	1.5	2.0	3.0
5	1.5	1.0	1.0	1.5		2.0	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0	1.5	2.0	2.0	3.0
6	2.0	2.5	2.5	2.0	2.0		2.0	2.0	1.5	1.5	1.0	2.0	1.5	1.5	3.0
7	2.0	2.0	2.5	2.5	1.5	2.0		3.5	1.5	2.5	2.0	2.0	1.5	2.0	3.0
8	2.5	2.0	2.0	1.5	1.5	2.0	3.5		1.0	1.5	2.0	1.0	2.0	1.5	4.0
9	2.0	2.5	2.5	2.0	2.0	1.5	1.5	1.0		3.5	1.5	1.0	1.5	2.0	3.0
10	3.0	2.0	2.0	1.5	2.0	1.5	2.5	1.5	3.5		1.5	1.0	2.0	2.0	4.0
11	3.0	3.0	3.0	2.0	2.0	1.0	2.0	2.0	1.5	1.5		2.0	2.0	1.5	3.0
12	2.5	2.0	2.0	2.0	1.5	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	2.0		1.0	1.0	0
13	2.0	2.5	2.5	1.5	2.0	1.5	1.5	2.0	1.5	2.0	2.0	1.0		1.5	3.0
14	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	1.5	2.0	1.5	2.0	2.0	1.5	1.0	1.5		3.0
15	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	4.0	3.0	4.0	3.0	0	3.0	3.0	

Tabela 5.4 - Distâncias mínimas verticais de segurança entre os equipamentos na fabricação de papel Tissue.

Distâncias Verticais de Segurança entre os Equipamentos (m)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		2.5	3.0	2.5	2.0	5.0	3.0	3.0	2.5	3.0	5.0	3.0	2.5	3.5	3.0
2	2.5		4.0	3.5	3.0	3.4	3.5	4.0	3.5	3.5	5.5	4.0	3.5	2.5	3.0
3	3.0	4.0		4.0	2.5	5.0	4.0	2.0	4.0	4.0	4.4	2.0	4.0	2.0	3.0
4	2.5	3.5	4.0		3.0	5.5	3.5	4.0	3.5	4.0	5.5	4.0	3.5	2.5	3.0
5	2.0	3.0	2.5	3.0		3.0	3.0	2.5	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0	2.5	3.0
6	5.0	3.4	4.0	5.5	3.0		3.4	4.0	3.4	3.4	3.4	4.0	3.4	3.0	3.0
7	3.0	3.5	4.0	3.5	3.0	3.4		4.0	3.5	3.5	3.4	3.4	3.5	2.5	3.0
8	3.0	0,5	2.0	3.5	2.5	4.0	4.0		4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	2.5	3.0
9	2.5	3.5	4.0	3.5	3.0	3.4	3.5	4.0		3.5	3.4	4.0	3.5	2.5	3.0
10	3.0	3.5	4.0	4.0	3.0	3.4	3.5	4.0	3.5		3.4	1.0	3.5	2.5	3.0
11	5.0	5.5	4.4	5.5	3.0	3.4	3.4	4.0	3.4	3.4		4.0	3.4	2.5	3.0
12	3.0	4.0	2.0	4.0	2.5	4.0	3.4	4.0	4.0	1.0	4.0		1.0	1.0	0.0
13	2.5	3.5	4.0	3.5	3.0	3.4	3.5	4.0	3.5	3.5	3.4	1.0		2.5	3.0
14	3.5	2.5	2.0	2.5	2.5	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	1.0	2.5		3.0
15	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	0.0	3.0	3.0	

5.2.2. Posicionamento dos Bocais

A tabela 5.5 mostra a orientação dos bocais dos equipamentos, em relação à FX, FY e FZ.

Tabela 5.5 - Posicionamento dos bocais dos equipamentos.

Bocal	Equipamento	Posição Bocal		
		FX	FY	FZ
1	1	0	0	1
2		-1	0	0
3	2	1	0	0
4		0	0	1
5	3	0	0	1
6		1	0	0
7	4	1	0	0
8		0	0	1
9	5	0	0	1
10		0	0	1
11	6	1	0	0
12		1	0	0
15	7	-1	0	0
16		1	0	0
13	8	1	0	0
14		0	0	1
17	9	0	0	1
18		0	1	0
19	10	1	0	0
20		-1	0	0
21	11	1	0	0
22		-1	0	0
23	12	1	0	0
24		-1	0	0
25	13	-1	0	0
26		1	0	0
32		0	0	-1
27		-1	0	0

28		1	0	0
29	14	0	0	1
30		0	0	-1
31		-1	0	0
33	15	0	0	1
34		1	0	0

5.2.3 Custos de Tubulação

Custos unitários de tubulação, suportes e tamanho da planta devem ser obtidos para cada caso específico. Quando isto não for possível, esses custos podem ser obtidos a partir de informação disponível na literatura (GUTHRIE, 1974; PETERS & THIMMERHAUS, 1991). Os custos que mais influenciam na otimização do layout são os custos de suportes e tubulação.

Tabela 5.6 - Dados das tubulações em relação ao diâmetro necessário para fluxo de massa.

Tubo Schedule 5S					
	Equipamento	ϕ	Peso (kg/m)	R\$/Kg.m	dólar/m
1	2	14"	34,854	623,88	207,962
2	3	8"	14,997	268,44	89,482
3	4	6"	11,475	205,40	68,468
4	5	8"	14,997	268,44	89,482
5	6	6"	11,475	205,44	68,468
6	7	6"	11,475	205,44	68,468
7	6	6"	11,475	205,44	68,468
6	8	6"	11,476	205,44	68,468
8	9	6"	11,476	205,44	68,468
9	10	8"	14,997	268,44	89,482
10	11	6"	11,475	205,44	68,468
11	12	6"	11,475	205,44	68,468
12	13	6"	11,475	205,44	68,468
13	14	8"	14,997	268,44	89,482
14	15	16"	42,182	755,06	251,686
12	15	3"	4,584	82,053	27,351

Fonte: Carbinox

Para obter os fatores de custo unitário para o suporte do componente i , C_{ik}^{sa} e C_{ik}^{sb} , foram consideradas as correlações (Eq 39 à 46) obtidas em GUIRARDELLO (1992), estas correlações são referentes a uma construção nível pesado GUTHRIE (1974):

$$C_{i1}^{sa} = \text{Área}_i * 62,8765 \quad (39)$$

$$C_{i2}^{sa} = \text{Área}_i * 95,3989 \quad (40)$$

$$C_{i3}^{sa} = \text{Área}_i * 115,9964 \quad (41)$$

$$C_{i4}^{sa} = \text{Área}_i * 140,9302 \quad (42)$$

$$C_{i1}^{sb} = \text{Área}_i * 0,0 \quad (43)$$

$$C_{i2}^{sb} = \text{Área}_i * (-99,1281) \quad (44)$$

$$C_{i3}^{sb} = \text{Área}_i * (-224,6904) \quad (45)$$

$$C_{i4}^{sb} = \text{Área}_i * (-528,6832) \quad (46)$$

onde: $i = 1, \dots, N_{cp}$.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente foi realizado um estudo com os modelos utilizados por PISSINATO (2001) para testar o desempenho da versão mais recente disponível no momento no laboratório do solver CPLEX, e com posterior comparação dos resultados obtidos pelo autor citado. De posse da excelente performance obtida pelo solver, o circuito de massa da unidade de fabricação de papel Tissue foi implementada em GAMS, em uma estação de trabalho Sun Enterprise E 250.

A vantagem de se usar o pacote comercial GAMS, é a possibilidade de realizar certos ajustes, que incluem desde a maior disponibilização de memória, acréscimos nos limites de tempo de execução, de nós a serem usados, de iterações, como também mudanças relativas aos algoritmos Branch and Bound, (PISSINATO, 2001).

O modelo foi testado dentro das estratégias de pesquisa do algoritmo Branch and Bound, Best Bound e Depth First. Teste preliminares foram realizados, e três estudos de caso foram selecionados para discussão dos resultados.

6.1. Teste de Performance do CPLEX 7.5

Foram testados os modelos utilizados por PISSINATO (2001), para observação da performance do solver CPLEX 7.5 em relação ao utilizado pelo autor CPLEX 6.0. Foi observado que o tempo computacional foi drasticamente reduzido, demonstrando a eficiência do mesmo.

Nas tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 apresenta-se uma comparação dos resultados obtidos utilizando o solver CPLEX 6.0 (PISSINATO, 2001) e CPLEX 7.5. Todos os dados

utilizados para obtenção dos valores, bem como o fluxograma de cada planta utilizada encontra-se nos Anexos 2, 3 e 4.

Tabela 6.1 - Resultados comparativos da Planta Petroquímica.

	GAMS/CPLEX 6.0		GAMS/CPLEX 7.5	
	depth first	best bound	depth first	best bound
Tempo	31.917 s	33.621 s	171 s	195 s
Iterações MIP	1.368.147	1.409.567	50.447	50.532
Nós	273.675	271.445	4.529	4.528

Tabela 6.2 - Resultados comparativos da Planta de Polimerização.

	GAMS/CPLEX 6.0		GAMS/CPLEX 7.5	
	depth first	best bound	depth first	best bound
Tempo	352 s	321 s	4 s	4 s
Iterações MIP	10.120	8.993	832	1.003
Nós	2.696	2.370	126	142

Tabela 6.3 - Resultados comparativos da Planta de Recuperação de Mercúrio

	GAMS/CPLEX 6.0		GAMS/CPLEX 7.5	
	depth first	best bound	depth first	best bound
Tempo	119s	97s	2 s	3 s
Iterações MIP	2.505	2.023	671	606
Nós	795	683	115	90

6.2. Otimização da Planta de Fabricação de Papel Tissue

6.2.1. Estudos preliminares

O modelo de otimização de layout, na forma MILP, apresenta variáveis contínuas e variáveis inteiras. Dentre as variáveis inteiras, as variáveis binárias associadas com rotações possíveis (w_{ik}) são consideradas “fáceis”, pois aparecem em restrições que fornecem boas estimativas de “lower bound” no algoritmo de Branch and Bound. Já as variáveis binárias associadas com a não sobreposição e distância mínima entre pares de equipamentos são consideradas “difíceis”, pois aparecem de uma forma nas restrições que resultam em estimativas ruins de “lower bound”, o que leva ao algoritmo a um tempo excessivo para fechar o “gap” entre “upper bound” (melhor solução inteira) e “lower bound” (melhor relaxação).

Inicialmente foram realizados testes em que se resolveu o modelo na sua forma original, permitindo que o algoritmo encontrasse a melhor solução. Observou-se que isso levava a tempos excessivos de CPU, de dias, sem que o “gap” caísse de forma significativa (menor que 30%).

Tentou-se então fixar algumas das variáveis binárias de posição relativa ($w_{ij}^x, w_{ij}^y, w_{ij}^z$) para verificar se isso melhorava o resultado. Finalmente optou-se por fixar todas as variáveis binárias de posição relativa ($w_{ij}^x, w_{ij}^y, w_{ij}^z$), mas deixou-se livre todas as variáveis binárias de rotação (w_{ik}) e todas as variáveis contínuas, para que o algoritmo encontra-se a melhor solução nessas condições. Em função disso, três estudos de caso foram selecionados.

6.2.2. Estudo de Caso 01

Para o estudo de caso 01, nenhuma restrição em especial foi imposta, apenas foram declarados ao software GAMS, o fluxo no qual a massa de papel deveria seguir, passando seqüencialmente de um equipamento e outro.

Observamos, que para as duas estratégias best bound e depth first, os valores obtidos foram iguais, demonstrando que as duas pesquisas foram eficientes na minimização dos custos (suportes, terreno e tubulações) e na melhor localização dos equipamentos.

A tabela 6.4 apresenta os valores encontrados para o custo, sendo que o valor ótimo foi de US\$ 42.711,03.

O custo do terreno foi considerado bidimensionalmente, no qual o custo do perímetro foi de $C^{per} = \text{US\$ } 300,00/\text{m}$, sendo que as dimensões obtidas foram $X = 35,2 \text{ m}$ e $Y = 21,1 \text{ m}$.

O valor obtido pelo GAMS em relação ao custo do terreno, é devido à seguinte equação:

$$2 * CPER * (X + Y) = \text{US\$ } 33.780,00$$

Tabela 6.4 - Resultados obtidos para o custo para Estudo de Caso 01 para a estratégia best bound e depth first.

Custo – Estudo de Caso 01	
best bound e depth first	
Terreno	33.780,00
Suporte	360,93
Tubulação	8.570,11
Z Ótimo	42.711,03

Na tabela 6.5 são apresentados os tempos computacionais gastos, bem como o número de iterações efetuadas e a quantidade de nós analisados.

Tabela 6.5 - Resultados obtidos para Estudo de Caso 01 para a estratégia best bound e depth first

Estudo de Caso 01	
“best bound” e “depth first”	
Tempo	0 s
Nº Iterações	237
Nós	0

Na tabela 6.6 são apresentados os valores do custo envolvido por cada suporte de cada um dos equipamentos, sendo o custo total de US\$ 360,93.

Tabela 6.6 - Custo dos suportes para cada componente da fabricação de papel Tissue – Estudo de Caso 01 estratégia best bound e depth first.

Equipamento	best bound e depthfirst
1	-
2	247,57
3	-
4	49,29
5	-
6	50,77
7	-
8	-
9	6,36
10	-
11	6,91
12	-
13	-
14	-
15	-
Total	360,93

Na tabela 6.7, é apresentado o comprimento de cada tubo em relação à localização de cada equipamento, para cada estratégia a tubulação varia de comprimento, mas neste caso, para as duas estratégias o comprimento dos tubos foram iguais.

Tabela 6.7 - Comprimento dos tubos, em metros.

Estudo de Caso 01						
best bound e depth first						
Tubo	LXP	LXN	LYP	LYN	LZP	LZN
1	0,500	-	-	-	-	-
2	6,750	-	-	-	-	2,250
3	4,250	-	-	0,700	1,650	-
4	2,125	-	-	-	-	-
5	2,225	-	3,600	-	0,200	-
6	3,550	-	0,400	-	0,650	-
7	-	3,050	-	-	-	-
8	-	17,500	5,400	-	-	4,200
9	1,000	-	-	0,150	2,100	-
10	3,500	-	-	-	-	-
11	2,000	-	-	-	-	-
12	-	0,500	3,800	-	-	-
13	6,850	-	-	2,650	-	0,050
14	2,500	-	0,700	-	-	1,800
15	-	-	3,800	-	-	2,750
16	11,750	-	3,500	-	3,400	-

A tabela 6.8 representa o custo em dólares envolvidos mediante a quantidade total de tubulação necessária para conexão entre os equipamentos.

Tabela 6.8 - Custo de tubulação para o Estudo de Caso 01

CP(K)	ΣL^*	$\Sigma L^*CP(K)$
(US\$/m)	(m)	(US\$)
207,962	0,500	103,9810
89,482	9,000	805,3380
68,468	6,600	451,8888
89,482	2,125	190,1493
68,468	6,025	412,5197
68,468	4,600	314,9528
68,468	3,050	208,8274
68,468	27,100	1.855,4828
68,468	3,250	222,5210
89,482	3,500	313,1870
68,468	2,000	136,9360
68,468	4,300	294,4124
68,467	9,550	653,8599
89,482	5,000	447,4100
251,686	6,550	1.648,5433
27,351	18,650	510,0962
	Total	8.570,1055

Na tabela 6.9 podemos observar a posição do centro de cada componentes nos três eixos Xi, Yi e Zi, cujas posições foram utilizadas para visualização dos layouts mediante utilização do software Autocad 2004.

Tabela 6.9 - Posições do centro dos componentes.

Estudo de Caso 01			
best bound e depth first			
Equipamento	Xi	Yi	Zi
1	33.700	19.100	2.750
2	31.200	19.100	2.750
3	24.450	19.100	2.750
4	19.800	17.800	1.100
5	17.675	17.800	0.750
6	15.200	14.200	1.300
7	11.900	14.200	0.650
8	32.950	8.800	2.750
9	29.450	8.950	0.650
10	25.100	8.950	0.650
11	22.750	8.950	0.650
12	22.500	5.150	0.650
13	13.950	7.800	0.700
14	10.750	7.100	1.250
15	10.750	1.650	2.750

Na tabela 6.10 são representados os números de equações e variáveis empregadas na implementação do modelo e na execução do programa GAMS.

Tabela 6.10 - Número de equações e variáveis utilizadas.

Estudo de Caso 01	
Bloco de Equações	25
Bloco de Variáveis	24
Elementos não-zero	9.308
Equações Simples	1.678
Variáveis Simples	1.642
Variáveis Discretas	645

Nas tabelas 6.11 e 6.12 são apresentadas as posições relativas entre os componentes para o Estudo de Caso 01 para as estratégias best bound e depth first.

Tabela 6.11 - Orientações dos componentes em X para a posição relativa entre os componentes i e j

$W^{x:ij}$									
1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	2,3	2,4	2,5	2,6	3,4
3,5	3,6	4,5	4,6	5,6	6,7	8,9	8,10	8,11	8,12
8,13	8,14	9,10	9,11	9,12	9,13	9,14	10,11	10,12	10,13
10,14	11,13	11,14	12,13	12,14	12,15	13,14			

Tabela 6.12 - Orientações dos componentes em Y para a posição relativa entre os componentes i e j

$W^{y:ij}$									
1,7	1,8	1,9	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	2,7
2,8	2,9	2,10	2,11	2,12	2,13	2,14	2,15	3,7	3,8
3,9	3,10	3,11	3,12	3,13	3,14	3,15	4,7,4,8	4,9	4,10
4,11	4,12	4,13	4,14	4,15	5,7	5,8	5,9	5,10	5,11
5,12	5,13	5,14	5,15	6,8	6,9	6,10	6,11	6,12	6,13
6,14	6,15	7,8	7,9	7,10	7,11	7,12	7,13	7,14	7,15
8,15	9,15	10,15	11,12	11,15	13,15	14,15			

6.2.3. Estudo de Caso 02

Diferentemente do primeiro estudo de caso apresentado, a principal restrição imposta ao segundo modelo foi, que o tanque de diluição ficasse necessariamente abaixo da máquina de papel, visto que é neste tanque onde se faz a diluição da massa, para posterior entrada na caixa de entrada e, por conseguinte formação da folha de papel na mesa plana. Para os demais equipamentos não foi imposta nenhuma restrição obrigatória, apenas indicando a seqüência necessária para o fluxo de massa, deixando com que o GAMS, realizasse a melhor escolha de localização dos equipamentos.

Observamos que igualmente ao estudo de caso 01, as duas estratégias best bound e depth first, originaram valores iguais dos resultados, demonstrando que as duas pesquisas são eficientes na minimização dos custos (suportes, terreno e tubulações) e na melhor localização dos equipamentos.

A tabela 6.13 apresenta os valores encontrados para o custo, sendo que o valor ótimo foi de US\$ 41.928,95.

O custo do terreno foi considerado bidimensionalmente, onde o custo do perímetro foi de $C^{per} = US\$ 300,00/m$, sendo que as dimensões obtidas foram $X = 22,4$ m e $Y = 21,1$ m. O valor obtido pelo GAMS é devido à seguinte equação:

$$2*CPER*(X+Y) = US\$ 26.100,00$$

Tabela 6.13 - Resultados obtidos para o custo para Estudo de Caso 02 para a estratégia best bound e depth first.

Custo – Estudo de Caso 02	
best bound e depth first	
Terreno	26.100,00
Suporte	2.343,01
Tubulação	12.855,93
Z Ótimo	41.928,95

Na tabela 6.14 são apresentados os tempos computacionais gastos, bem como o número de iterações efetuadas e a quantidade de nós analisados.

Tabela 6.14 - Resultados obtidos para Estudo de Caso 02 para a estratégia best bound e depth first.

Estudo de Caso 02	
best bound e depth first	
Tempo	1 s
Nº Iterações	244
Nós	0

Na tabela 6.15 são apresentados os valores do custo envolvido por cada suporte de cada um dos equipamentos, sendo o custo total de US\$ 2.343,01.

Tabela 6.15 - Custo dos suportes para cada componente da fabricação de papel Tissue – Estudo de Caos 02 estratégia best bound e depth first.

Equipamento	best bound e depth first
1	-
2	247,57
3	-
4	165,49
5	171,28
6	1.238,23
7	321,96
8	-
9	6,36
10	-
11	192,08
12	-
13	-
14	-
15	-
Total	2.343,01

Na tabela 6.16 é apresentado o comprimento de cada tubo em relação à localização de cada equipamento, para cada estratégia a tubulação varia de comprimento, mas neste caso, nas duas estratégias são iguais.

Tabela 6.16 - Comprimento dos tubos, em metros.

Estudo de Caso 02						
best bound e depth first						
Tubo	LXP	LXN	LYP	LYN	LZP	LZN
1	0,50	-	-	-	-	-
2	6,75	-	-	-	-	2,25
3	4,25	-	-	0,70	-	-
4	2,125	-	-	-	-	6,85
5	0,275	-	3,60	-	-	3,45
6	3,55	-	0,40	-	9,752	-
7	-	3,05	-	-	-	9,102
8	-	12,60	5,40	-	7,95	-
9	1,00	-	-	0,15	2,10	-
10	3,50	-	-	-	-	-
11	-	2,65	2,15	-	-	4,50
12	-	0,35	4,65	-	8,90	-
13	3,00	-	-	1,65	-	0,05
14	2,30	-	-	-	-	0,70
15	-	7,70	-	-	-	8,25
16	-	-	-	-	-	1,00

A tabela 6.17 representa o custo em dólares envolvidos mediante a quantidade total de tubulação necessária para conexão entre os equipamentos.

Tabela 6.17 - Custo de tubulação para o Estudo de Caso 02

Tubo	CP(K) (US\$/m)	ΣL^* (m)	$\Sigma L^*CP(K)$ (US\$)
1	207,962	0,500	103,9810
2	89,482	9,000	805,3380
3	68,468	4,950	338,9166
4	89,482	8,975	803,1010
5	68,468	7,325	501,5281
6	68,468	13,702	938,1485
7	68,468	12,152	832,0231
8	68,468	25,950	1.776,7446
9	68,468	3,250	222,5210
10	89,482	3,500	313,1870
11	68,468	9,300	636,7524
12	68,468	13,900	951,7052
13	68,467	4,700	321,7949
14	89,482	3,000	268,4460
15	251,686	15,950	4.014,3917
16	27,351	1,000	27,3510
	Total		12.855,9301

Na tabela 6.18 pode-se observar a posição do centro de cada componentes nos três eixos X_i , Y_i e Z_i , cujas posições foram utilizadas para visualização dos layouts mediante utilização do software Autocad 2004.

Tabela 6.18 - Posições do centro dos componentes.

Estudo de Caso 02			
best bound e depth first			
Equipamento	X_i	Y_i	Z_i
1	20.900	19.100	2.750
2	18.400	19.100	2.750
3	11.650	19.100	2.750
4	7.000	17.800	2.750
5	4.875	17.800	9.250
6	4.350	14.200	13.450
7	1.050	14.200	3.698
8	17.200	8.800	2.750
9	13.700	8.950	0.650
10	9.350	8.950	0.650
11	11.400	6.550	5.150
12	10.750	1.650	-3.750
13	6.050	3.300	-3.700
14	3.050	3.300	-4.250
15	10.750	1.650	2.750

Na tabela 6.19 são representados os números de equações e variáveis empregadas na implementação do modelo e na execução do programa GAMS.

Tabela 6.19 - Número de equações e variáveis utilizadas.

Estudo de Caso 02	
Bloco de Equações	27
Bloco de Variáveis	24
Elementos não-zero	9.312
Equações Simples	1.680
Variáveis Simples	1.642
Variáveis Discretas	645

Nas tabelas 6.20, 6.21 e 6.22 são apresentadas as posições relativas entre os componentes para o Layout 02 para as estratégias best bound e depth first.

Tabela 6.20 - Orientações dos componentes em X para a posição relativa entre os componentes i e j

W^{xij}									
1,3	1,4	1,5	1,6	2,3	2,4	2,5	2,6	3,5	3,6
4,5	4,6	6,7	8,10	8,11	8,12	8,13	8,14	9,10	9,11
9,12	9,13	9,14	10,13	10,14	11,13	11,14	12,13	12,14	13,14

Tabela 6.21 - Orientações dos componentes em Y para a posição relativa entre os componentes i e j

W^{yij}									
1,7	1,8	1,9	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	2,7
2,8	2,9	2,10	2,11	2,12	2,13	2,14	2,15	3,7	3,8
3,9	3,10	3,11	3,12	3,13	3,14	3,15	4,7	4,8	4,9
4,10	4,11	4,12	4,13	4,14	4,15	5,8	5,9	5,10	5,11
5,12	5,13	5,14	6,8	6,9	6,10	6,11	6,12	6,13	6,14
7,8	7,9	7,10	7,11	7,12	7,12	7,14	7,15	8,15	9,15
10,15	11,12	11,15	13,15	14,15					

Tabela 6.22 - Orientações dos componentes em Z para a posição relativa entre os componentes i e j

W ^z _{ij}									
1,2	3,4	5,7	5,15	6,5	6,15	8,9	10,12	11,10	15,12

6.2.4. Estudo de Caso 03

No terceiro estudo de caso a restrição imposta ao programa, foi que além da necessidade da localização tanque de diluição abaixo da máquina de papel, também as bombas necessariamente ficassem abaixo dos tanques. Neste caso também todas as variáveis de posições relativas foram fixadas.

Com isso, os custos de suportes, tubulação e terreno foram maiores, mesmo apresentando um bom layout final dos equipamentos. Abaixo seguem as tabelas com os resultados para a comparação.

A tabela 6.23 apresenta os valores encontrados para o custo, sendo que o valor ótimo foi de US\$ 59.346,68.

O custo do terreno foi considerado bidimensionalmente, onde o custo do perímetro foi de $C^{per} = US\$ 300,00/m$, sendo que a dimensões obtidas foram $X = 21,5m$ e $Y = 21,1 m$. O valor obtido pelo GAMS é devido à seguinte equação:

$$2*CPER*(X+Y) = US\$ 25.560,00$$

Tabela 6.23 - Resultados obtidos para o custo para estudo de caso 03 para a estratégia best bound e depth first.

Custo – Estudo de Caso 03	
best bound e depth first	
Terreno	25.560,00
Suporte	18.466,14
Tubulação	15.320,52
Z Ótimo	59.346,68

Na tabela 6.24 verifica-se que em relação ao segundo layout o tempo computacional foi o mesmo.

Tabela 6.24 - Resultados obtidos para estudo de caso 03 para a estratégia best bound e depth first.

Estudo de Caso 03	
best bound e depth first	
Tempo	1 s
Nº Iterações	235
Nós	0

Na tabela 6.25 são apresentados os valores dos custos envolvidos por cada suporte de cada um dos equipamentos, sendo o custo total de US\$ 18.466,14.

Tabela 6.25 - Custo dos suportes para cada componente da fabricação de papel Tissue – Estudo de Caso 03 estratégia best bound e depth first.

Equipamento	best bound e depth first
1	2.112,91
2	-
3	9.328,45
4	-
5	171,28
6	1.238,23
7	321,96
8	5.101,19
9	-
10	-
11	192,08
12	-
13	-
14	-
15	-
Total	18.466,14

Na tabela 6.26 é apresentado o comprimento de cada tubo em relação à localização de cada equipamento, para cada estratégia a tubulação varia de comprimento, mas neste caso, nas duas estratégias são iguais.

Tabela 6.26 - Comprimento dos tubos, em metros.

Estudo de Caso 03						
best bound e depth first						
Tubo	LXP	LXN	LYP	LYN	LZP	LZN
1	-	-	-	-	5,75	-
2	6,75	-	-	-	-	9,30
3	3,05	-	-	-	7,15	-
4	2,425	-	-	-	-	9,20
5	0,275	-	3,30	-	-	3,45
6	3,55	-	0,40	-	9,752	-
7	-	3,05	-	-	-	9,102
8	-	9,50	5,40	-	2,95	-
9	2,00	-	-	0,15	7,25	-
10	3,50	-	-	-	-	0,15
11	-	0,20	2,10	-	-	4,50
12	-	1,00	5,20	-	8,90	-
13	3,00	-	-	6,15	-	4,45
14	2,30	-	0,50	-	-	1,80
15	-	7,70	4,00	-	-	2,75
16	-	-	-	-	-	1,00

A tabela 6.27 representa o custo em dólares envolvidos mediante a quantidade total de tubulação necessária para conexão entre os equipamentos.

Tabela 6.27 - Custo de tubulação para o Estudo de Caso 03

CP(K)	ΣL^*	$\Sigma L^*CP(K)$
(US\$/m)	(m)	(US\$)
207,962	5,750	1.195,7815
89,482	16,050	1.436,1861
68,468	10,200	698,3736
89,482	11,625	1.040,2283
68,468	7,025	480,9877
68,468	13,702	938,1485
68,468	12,152	832,0231
68,468	17,850	1.222,1538
68,468	9,400	643,5992
89,482	3,650	326,6093
68,468	6,800	465,5824
68,468	15,100	1.033,8668
68,467	13,600	931,1512
89,482	4,600	411,6172
251,686	14,450	3.636,8627
27,351	1,000	27,3510
	Total	15.320,5224

Na tabela 6.28 pode-se observar a posição do centro de cada componentes nos três eixos Xi, Yi e Zi, cujas posições foram utilizadas para visualização dos layouts mediante utilização do software Autocad 2004.

Tabela 6.28 - Posições do centro dos componentes.

Estudo de Caso 03			
best bound e depth first			
Equipamento	Xi	Yi	Zi
1	20.000	19.100	6.250
2	18.000	19.100	0.500
3	11.250	19.100	7.550
4	8.200	17.500	0.400
5	5.775	17.500	9.250
6	5.250	14.200	13.450
7	1.950	14.200	3.698
8	15.000	8.800	7.750
9	15.000	8.950	0.500
10	10.650	8.950	0.650
11	10.500	6.850	5.150
12	10.750	1.650	-3.750
13	6.050	7.800	0.700
14	3.050	7.300	1.250
15	10.750	1.650	2.750

Na tabela 6.29, são representados os números de equações e variáveis empregadas na implementação do modelo e na execução do programa GAMS.

Tabela 6.29 - Número de equações e variáveis utilizadas.

Estudo de Caso 03	
Bloco de Equações	27
Bloco de Variáveis	24
Elementos não-zero	9.312
Equações Simples	1.680
Variáveis Simples	1.642
Variáveis Discretas	645

Nas tabelas 6.30, 6.31 e 6.32 são apresentadas as posições relativas entre os componentes para o Estudo de Caso 03 para as estratégias best bound e depth first.

Tabela 6.30 - Orientações dos componentes em X para a posição relativa entre os componentes i e j

$W^{x_{ij}}$									
1,3	1,4	1,5	1,6	2,3	2,4	2,5	2,6	3,5	3,6
4,5	4,6	6,7	8,10	8,11	8,12	8,13	8,14	9,10	9,11
9,12	9,13	9,14	10,13	10,14	11,13	11,14	12,13	12,14	13,14

Tabela 6.31 - Orientações dos componentes em Y para a posição relativa entre os componentes i e j

$W^{y_{ij}}$									
1,7	1,8	1,9	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	2,7
2,8	2,9	2,10	2,11	2,12	2,13	2,14	2,15	3,7	3,8
3,9	3,10	3,11	3,12	3,13	3,14	3,15	4,7	4,8	4,9
4,10	4,11	4,12	4,13	4,14	4,15	5,8	5,9	5,10	5,11
5,12	5,13	5,14	6,8	6,9	6,10	6,11	6,12	6,13	6,14
7,8	7,9	7,10	7,11	7,12	7,12	7,14	7,15	8,15	9,15
10,15	11,12	11,15	13,15	14,15					

Tabela 6.32 - Orientações dos componentes em Z para a posição relativa entre os componentes i e j

$W^{z_{ij}}$									
1,2	3,4	5,7	5,15	6,5	6,15	8,9	10,12	11,10	15,12

6.3. Vistas dos Estudos de Caso 01, 02 e 03.

Após a obtenção dos resultados fornecidos pelo GAMS, utilizou-se o software AutoCad 2004, para realização dos layouts da localização dos equipamentos da planta de fabricação de papel Tissue.

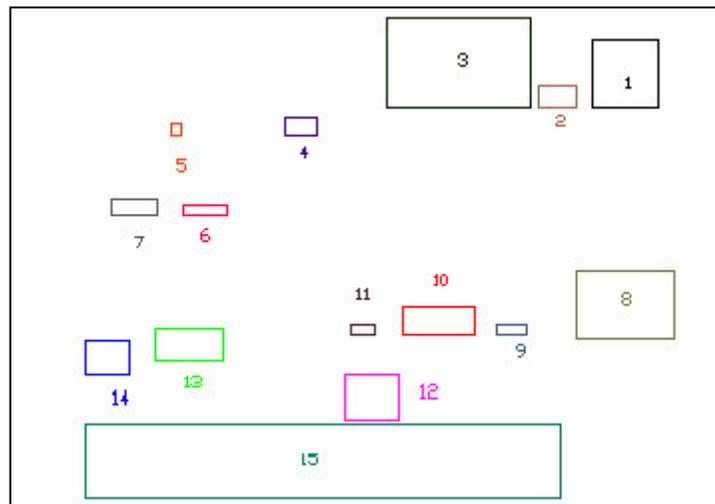


Figura 6.1 - Vista Superior – Estudo de Caso 01

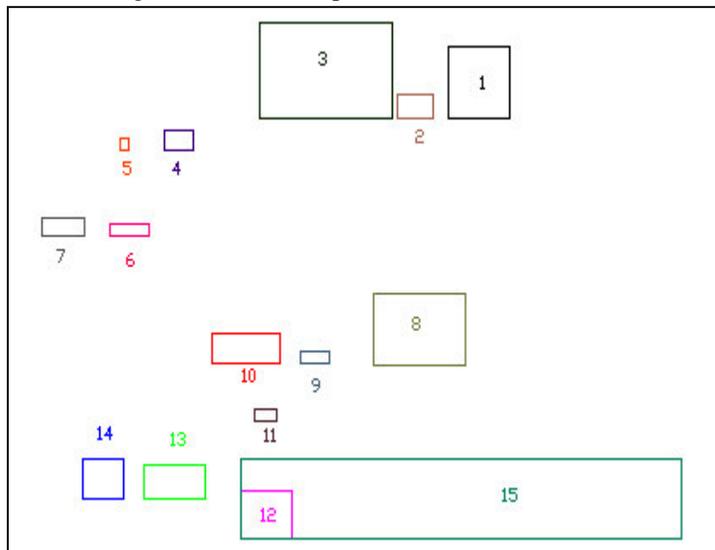


Figura 6.2 - Vista Superior – Estudo de Caso 02

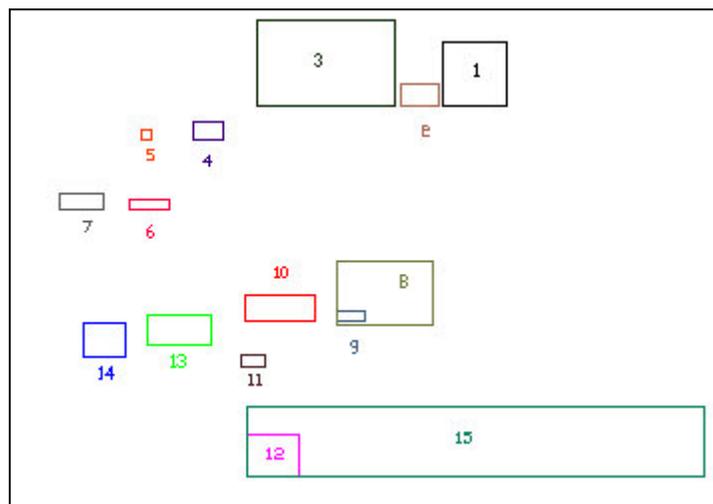


Figura 6.3 - Vista Superior – Estudo de Caso 03

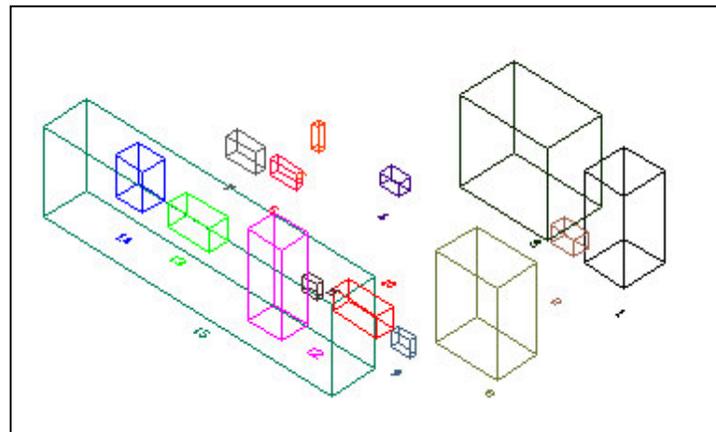


Figura 6.4 - Vista Isométrica SE – Estudo de Caso 01

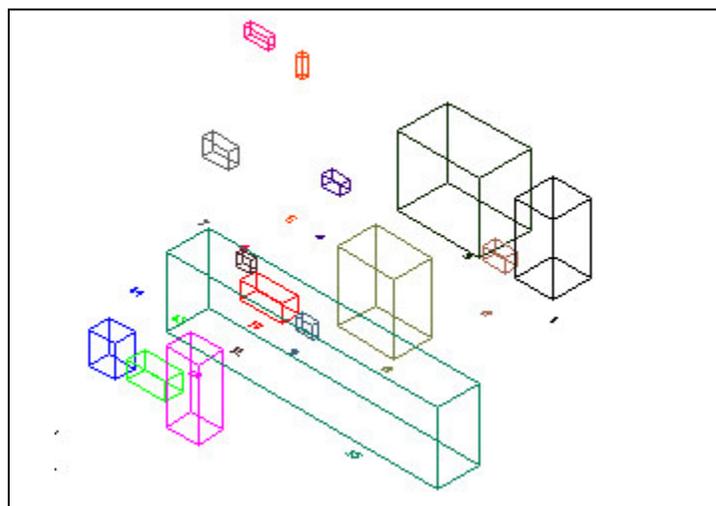


Figura 6.5 - Vista Isométrica SE – Estudo de Caso 02

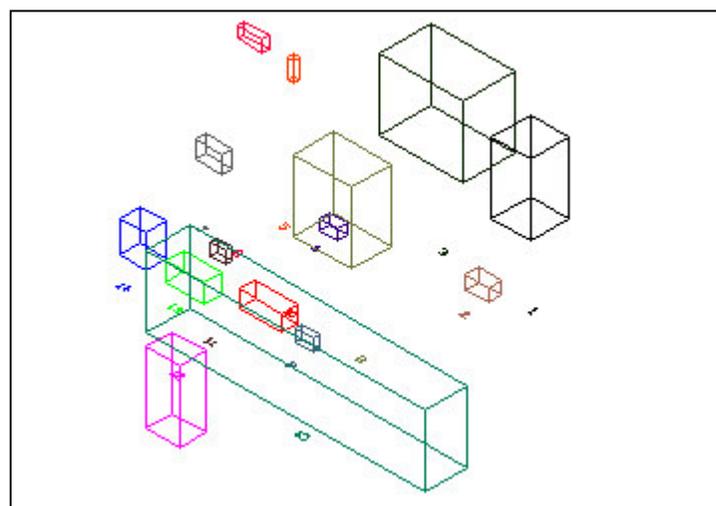


Figura 6.6 - Vista Isométrica SE – Estudo de Caso 03

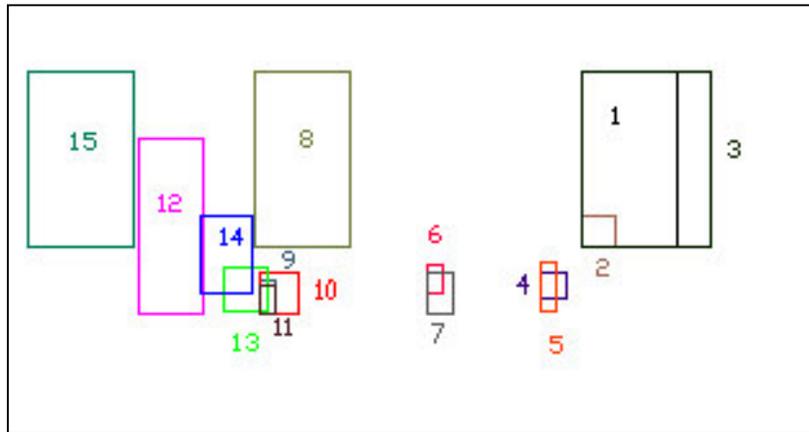


Figura 6.7 - Vista Lateral – Estudo de Caso 01

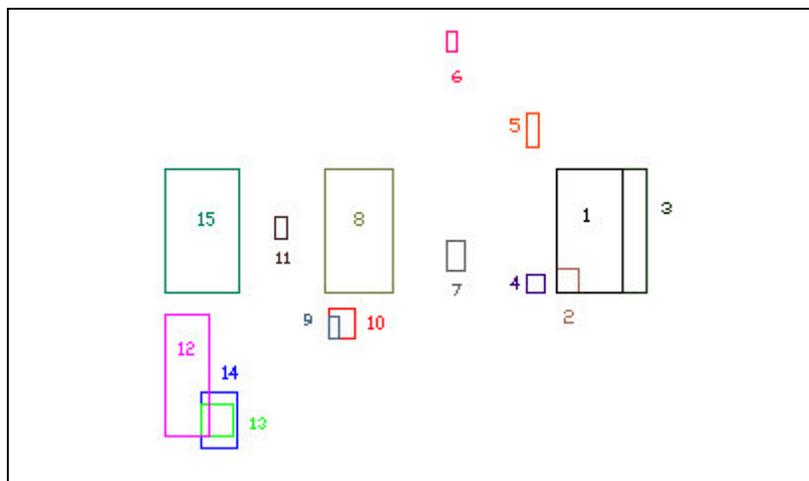


Figura 6.8 - Vista Lateral – Estudo de Caso 02

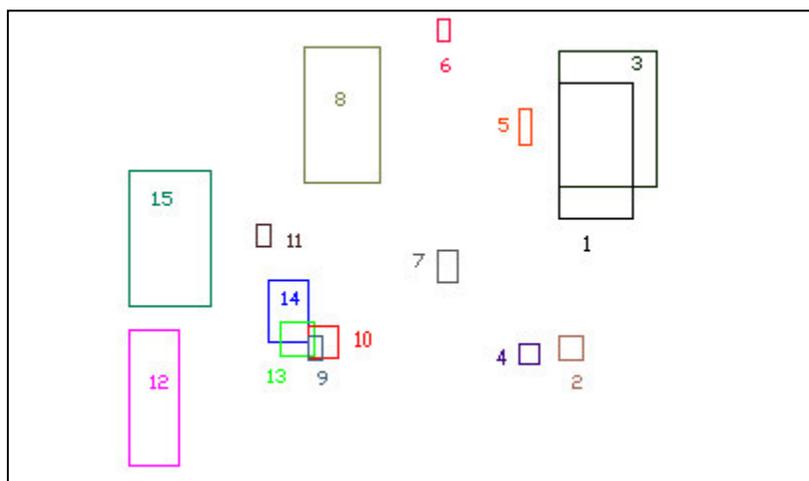


Figura 6.9 - Vista Lateral – Estudo de Caso 03

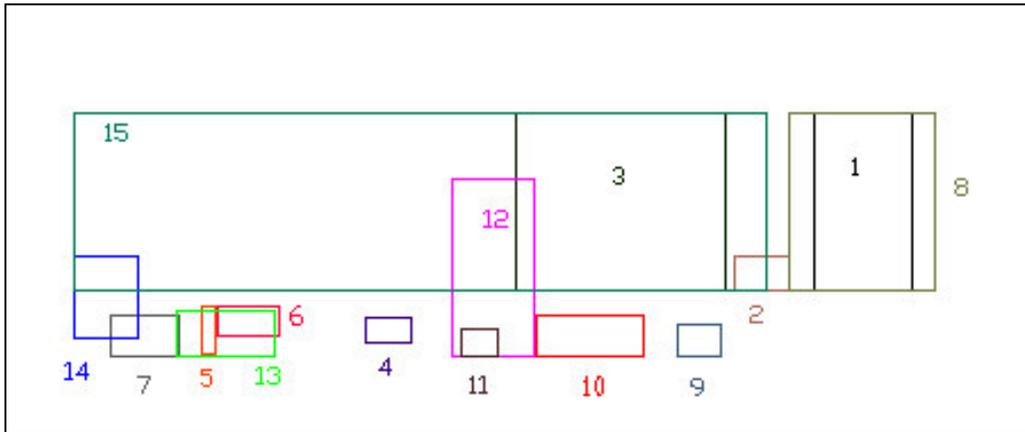


Figura 6.10 - Vista Lateral – Estudo de Caso 03

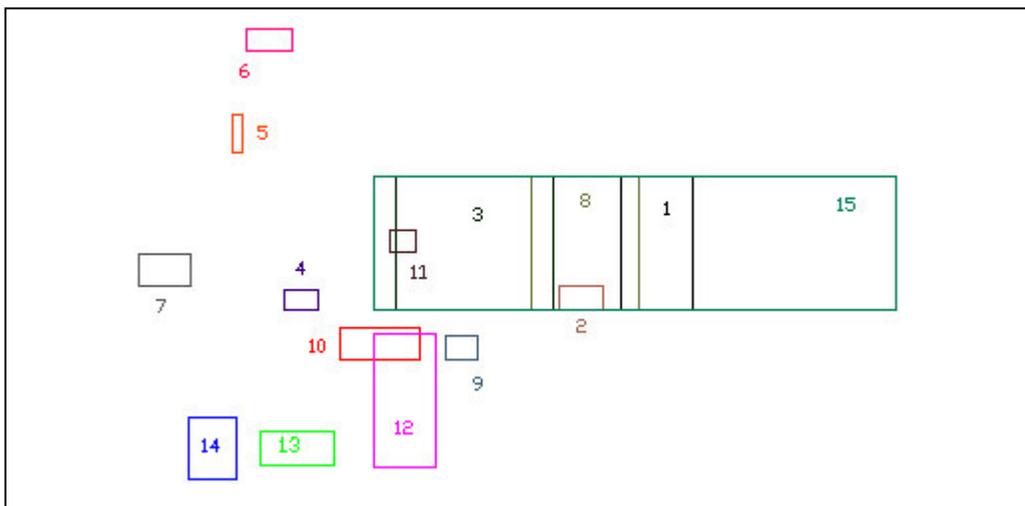


Figura 6.11 - Vista Lateral – Estudo de Caso 03

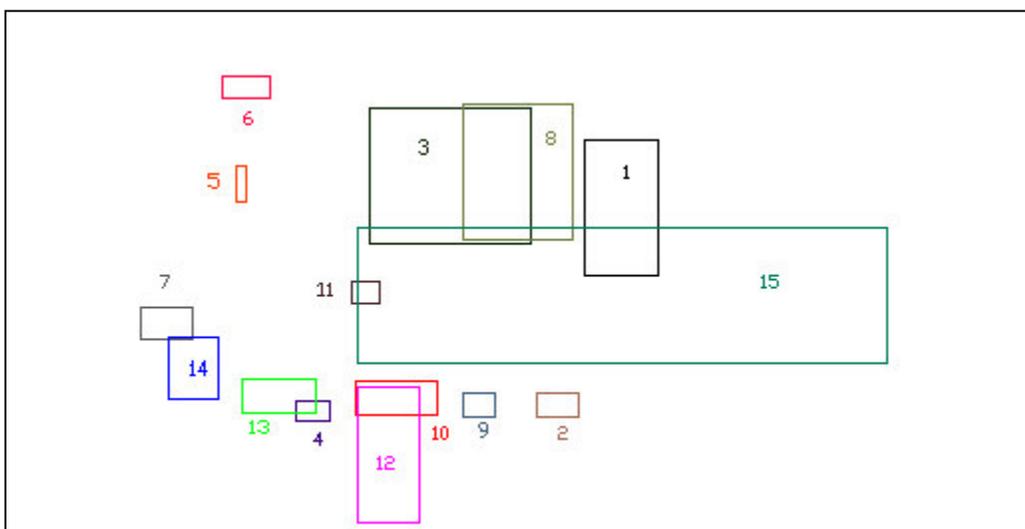


Figura 6.12 - Vista Lateral – Estudo de Caso 03

6.4. Conclusão

Podemos observar neste trabalho os seguintes tópicos:

- Que o algoritmo utilizado para a resolução do problema foi muito eficiente;
- O tempo computacional foi muito bom, apesar da grande quantidade de variáveis de posições terem sido necessariamente fixadas, devido a grande quantidade de equipamentos na planta de fabricação Tissue;
- Observou-se que quanto menor a quantidade de variáveis de posições que foram fixadas, o tempo computacional, não foi bom, mesmo com valores de Z ótimo próximo ao do melhor layout utilizado como resultado neste trabalho;
- O modelo o Estudo de Caso 02 foi o que melhor atendeu as expectativas deste trabalho, otimização dos componentes do circuito de massa de uma planta de fabricação de papel Tissue, visando redução de custo (suportes, terreno e tubulações).

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Entre os três estudos de caso considerados, o melhor modelo obtido do Estudo de Caso 02 (pág 90), pois minimizou os custo de suportes, terreno e tubulação, dentro da melhor localização dos equipamentos.

A utilização do pacote GAMS/CPLEX 7.5, na implementação do modelo existente demonstrou grande eficiência, permitindo atingir o objetivo deste trabalho no que tange a melhor localização dos equipamentos na planta Tissue e minimizar o custo de suportes, terreno e tubulação.

Podemos concluir também, que com a utilização deste mesmo pacote computacional, conseguimos obter melhores resultados no tempo dos que os obtidos por PISSINATO (2001).

Destaca-se ainda que a utilização do pacote comercial de otimização GAMS foi de grande facilidade de programação, e tornando possível resolver de forma exata problemas de otimização através de MILP, em um tempo muito bom.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, podemos sugerir:

- A utilização do modelo matemático para realização da otimização no circuito de água, na planta de papel Tissue, para complementação deste trabalho;

-
- Utilização deste mesmo modelo na otimização dos equipamentos na reciclagem de papel, visto que a quantidade de equipamentos a ser otimizada é bem maior e possibilitará a redução dos insumos de água e energia;
 - Utilização do solver mais recente, CPLEX 9.0.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMORESE, L.; CENA, V. & MUSTACCHI, C. A heuristic for the compact location of process components. *Chemical Engineering Science* 32, 119-124, 1977.
- ANDERSON, F. V. Plant layout. In: Kirk-Othmer, *Encyclopedia of Chemical Technology*, 3rd. ed., 18, pp.23-43, 1982.
- AVRIEL, M.; GOLANY, B. – “Mathematical programming for Industrial Engineers” – Marcel Dekker, Inc., New York, 1996, 637p.
- BAZARAA, M.S., & KIRCA, O., A branch-and-bound-based heuristic for solving the QAP, *Naval Research Logistics Quarterly* . Vol. 30, 287-304, 1983.
- BAZARAA, M.S., Computerized layout design: A branch and bound approach, *AIIE Transactions*. Vol. 7, No. 4, 432-437, 1975.
- BAZARAA, M.S., & ELSHAFEI, A .N., An exact branch and bound procedure for quadratic assignment problems. *Naval Research Logistics Quarterly*. Vol. 26, 109-121, 1979.
- BAZARAA, M.S., & SHERALI, M.D., Benders' partitioning scheme applied to a new formulation of the quadratic assignment problem. *Naval Research Logistics Quarterly*. Vol. 27, No. 1, 29-41, 1980.
- BURKARD, R.E., Die Störungsmethode zur lösung quadratisches zuordnungsprobleme, *Operations Research Verfahren*. Vol. 16, 84-108, 1973.
- BURKARD, R.E., & BONNINGER, T., A heuristic for quadratic Boolean program with applications to quadratic assignment problems, *European Journal of Operational Research*. Vol. 13, 374-386, 1983.
- BURKARD, R.E., & STRATMAN, K.H., Numerical investigations on quadratic assignment problems, *Naval Research Logistic Quarterly*. Vol. 25, 129-144, 1978.
- BURKARD, R.E., Locations with spatial interaction - Quadratic assignment problem, in: R.L. Francis and P.B. Mirchandane (eds.) *Discrete Locations Theory*, Academic Press, New York, 1984.

- BLAZEWICZ,J.;ECKER,K.H.;PESCH,E.SCHIDT,G.;WEGLARZ,J.J. – “Scheduling Computer and Manufacturing Process” – Springer – Verlag,Berlin, 1996.491p.
- BROOKE, A., KENDRICK, D. & MEERAUS, A. GAMS: a user’s guide. San Francisco: The Scientific Press, 1988.
- BUSH, M. J. & WELLS, G. L . Optimum plant layout scores on maintenance, operation, safety. Process Engineering, 53 (9), pp. 135-137, 1972.
- CORTES, M. B. S., Algoritmos Genéticos em Problemas de Programação Não Linear Contínua, (Tese de Doutorado), UFSC - Florianópolis - SC. 1996.
- EVANS, G.W., WILHELM, M.R., KARWOWSKI, W., A layout design heuristic employing the theory of fuzzy sets, International Journal of Production Research, Vol. 25, No. 10, 1431 - 1450, 1987.
- FRANCIS, R.L. & WHITE, J. A. Facility layout and location: an analytical approach. New Jersey: Prentice Hall, 1974.
- GAVETT, J.W., & PLYTER, N.V., The Optimal assignment of facilities to locations by branch and bound, Operations Research. Vol. 14, 210-232, 1966.
- GRAVES, G.W., & WHINSTONE, A .B., An algorithm for the quadratic assignment problem, Management Science. Vol. 17, No. 7, 453-471, 1970.
- GUIRARDELLO, R. Optimization of Process Plant Layout. Ph.D. Thesis, University of Wisconsin, Madison, USA ,1993.
- GUIRARDELLO, R. Otimização de Layout de Processos Químicos, Anais do 10º Congresso Brasileiro de Engenharia Química, São Paulo - SP, Vol. 2, pp. 1169-1174, 1994.
- GUNN, D. J. The optimised layout of a chemical plant by digital computer: Computer Aided Design, Spring ,11-16 ,1970.
- GUTHRIE, K. M. Process plant estimating evaluation and control. San Francisco: Craftsman Book Company of America, 1974.
- HERAGU, S. S. & KUSIAK, A., Efficient models for the facility layout problem, European Journal of Operational Research. 53, 1 - 13, 1991.
- HOUNSELL,MARCELO DA SILVA., Plant Layout,1999

- HOROWITZ,E.;SAHNI,S.;RAJASEKARAN,S. – “Computer Algorithms C++” Computer Science Press, New York, 1996,637p.
- KAKU, B.K. & THOMPSON, G.L., An exact algorithm for the general quadratic assignment problem, European Journal of Operational Research. Vol. 23, 382-390, 1986.
- KAURA, M. L. Plot plans include safety. Hydrocarbon Processing, 59 (7), pp. 183-194, 1980.
- KELLY, J. P., LAGUNA, M. e GLOVER, F., A Study of Diversification Strategies for the Quadratic Assignment Problem, Computers Operational Research. Vol. 21, No. 8, 885 - 893, 1994.
- KERN, R. How to manage plant design to obtain minimum cost. Chemical Engineering, 84 (11), pp. 130-136, 1977.
- KERN, R. Arranging the housed chemical process plant. Chemical Engineering, 85 (16), pp. 123-130, 1978.
- KOUVELIS, P., CHIANG, W. C. & YU, G., Optimal algorithms for row layout problems In automated manufacturing systems, IIE Transactions. Vol. 27, 99 - 104, 1995.
- LAND, A .H., A problem of assignment with interrelated costs, Operations Research Quarterly. Vol. 14, 185-198, 1963.
- LAVALLE, I., & ROUCAIROL, C., Parallel branch and bound algorithms, presented at Euro VIII, Bologna, Italy, 1985.
- LAWLER, E.L., The quadratic assignment problem. Management Science. Vol. 9, 586-599, 1963.
- LITTLE, J.D.C., MURTY, K.G., SWEENEY, D.W. & KAREL, C., An algorithm for the travelling salesman problem, Operations Research. Vol. 11, 972-989, 1963.
- LONA,LILIANE.,Notas de Aulas, 2003
- MECKLENBURGH, J. C.. Process plant layout. New York: Halsted Press - John Wiley & Sons, 1985.

- NIEDERBERGER, JAQUES – Simulação e Otimização de Processos – Otimização de Processos Químicos – PUC – Rio, 2004.
- OLIVÉRIO, J.L. Projeto de Fábrica IBLC, São Paulo, 1985.
- PARKER,R.G.;RARDIN.R.L. “Discrete Optimization” – Computer Science and Scientific Computing, Academic Press,Inc., 1998
- PALEKAR, U. S., BATTÀ, R., BOSCH, R. M. & ELHENCE, S., Modeling uncertainties In plant layout problems, European Journal of Operational Research. Vol. 63, 347 - 359, 1992.
- PIERCE, J.F. & CROWSTON, W.B., Tree-search algorithms for quadratic assignment problems, Naval Research Logistics Quarterly. Vol. 18, 1-36, 1971.
- PISSINATO, LUCILENE B. Otimização do posicionamento de componentes no layout de plantas químicas, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, 2001. Dissertação de Mestrado
- RARDIN,R.L.; “Optimization in Operations Research”.1ª e.Prentice Hall, New Jersey, (1998).
- RENDER,B.&STAIR,R.M. – “Quantitative Analysis for Management” – Prentice – Hall Inc. New Jersey sixth edition,1997,769p.
- SCHEY,JOHN.A. Introduction to Manufacturing Processes. Mc Graw-Hill Book Company,1987, Second Edition.
- SHAHBAZKIA,REZA HAMID.; Aulas de Algoritmos – 2000/2001.
- SOLETTI, J. I & CARVALHO, S.H.V. – “A utilização do pacote computacional GAMS na solução de problemas de otimização, aplicado ao ensino da Engenharia Química” – Enpromer’99.
- THOMPCKINS, J. A ., & WHITE, J.A ., Facilities Planning, John Wiley and Sons, New York, 1984.
- ULRICH, G.D. A guide to chemical engineering process design and economics. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- VIEIRA, A.C.G. Manual de Layout (Arranjo físico). RJ: Confederações Nacionais da Indústria, 1983.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS NA INTERNET

- www.eps.ufsc.br/disserta98/sulfert
- www.mdic.gov.br/cadeisprodutivas/doc12pepelcelulose.pdf
- www.iscte.pt/gei/pt_ii_cel_2002.pdf
- www.recipac.pt/textos/ciclo/ciclo.html
- www.maquinasdandrea.com.br/papel
- www.chapiom.com.br
- www.cspp.net/po
- www.abtcp.com.br
- www.ilab.com.br
- Www.Joinville.Udesc.Br//departamentos/dcc/professores/marcelo/disciplinas/AIN/plan_tlayout
- www.eps.ufsc.br/teses98/ivanqui/cap2.html
- www.piscopo.com.br/downloads/ADMINISTRACAO%20PRODUCAO.ppt
- www.ucg.br/Institutos/nucleos/nupenge/pdf/Frederico_Ferreira_Borges.pdf
- www.udesc.br/esag/professores/gdias/ads10/ads10-00-1/capit7/cap7-00.ppt
- www.wsparis.ws/producao/seminarios/layout.html
- www.imam.com.br/new/i5.htm
- Www.sobrapo.org.br/simposios/xxxiii/artigos
- http://www.bracelpa.org.br/estudantes_educadores/historia_mundo.htm
- http://www.sbs.org.br/destaques_mercado_de_papel.htm
- www.bndes.gov.br/conhecimento/setorial/is_g1_24.pdf
- www.carbinox.com.br
- www.aula, aulas de algoritmos.htm
- <http://www.albint.com.br/hp/papel/papel.asp#>

ANEXOS

ANEXO 1

Implementação do Modelo para unidade de Fabricação de Papel Tissue em GAMS/CPLEX 7.5

\$ONTEXT

\$include elementos

\$OFFTEXT

\$offlisting

\$include sets

\$include bocalpartida

\$include bocalchegada

\$include bocalcomponentes

ALIAS (I, J) ;

\$include scalars

PARAMETERS

\$include largura

\$include comprimento

\$include altura

\$include custotubo

AREA(I) area dos componentes i (metros quadrados),

CSA(I,KK) fator de custo unitario para o suporte do componente i,

CSB(I,KK) fator de custo unitario para o suporte do componente i,

M(I,J);

AREA(I) = A(I) * B(I);

CSA(I,'1') = AREA(I) * 62.8765;

CSA(I,'2') = AREA(I) * 95.3989;

CSA(I,'3') = AREA(I) * 115.9964;

CSA(I,'4') = AREA(I) * 140.9302;

CSB(I,'1') = AREA(I) * 0.0;

CSB(I,'2') = AREA(I) * (-99.1281);

CSB(I,'3') = AREA(I) * (-224.6904);

CSB(I,'4') = AREA(I) * (-528.6832);

M(I,J) = 0.5*((MAX(A(I),B(I)))+(MAX(A(J),B(J))));

\$include distanciainhorizontal

\$include distanciavertical

\$include nozzles

VARIABLES

XX dimensao do layout
YY dimensao do layout
ZZ dimensao do layout
T custo total do layout

CS(I) custo dos suportes para o componente i

LXP(K) comprimento do tubo k usando a distancia de Manhattan em x
LXN(K) comprimento do tubo k usando a distancia de Manhattan em x
LYP(K) comprimento do tubo k usando a distancia de Manhattan em y
LYN(K) comprimento do tubo k usando a distancia de Manhattan em y
LZP(K) comprimento do tubo k usando a distancia de Manhattan em z
LZN(K) comprimento do tubo k usando a distancia de Manhattan em z

X(I) posicao do centro do componente i
Y(I) posicao do centro do componente i
Z(I) posicao do centro do componente i

XN(P) posicao do nozzle p
YN(P) posicao do nozzle p
ZN(P) posicao do nozzle p

DX(I,J) distancia Manhattan entre os centros dos componentes i e j em x,y,z
DY(I,J) distancia Manhattan entre os centros dos componentes i e j em x,y,z
DZ(I,J) distancia Manhattan entre os centros dos componentes i e j em x,y,z

W(I,L) variavel inteira para a rotacao do componente i
WX(I,J) variavel inteira para a posicao relativa entre os componentes i e j
WY(I,J) variavel inteira para a posicao relativa entre os componentes i e j
WZ(I,J) variavel inteira para a posicao relativa entre os componentes i e j ;

POSITIVE VARIABLES XX,YY,ZZ,CS,LXP,LXN,LYP,LYN,LZP,LZN,DX,DY,DZ;

BINARY VARIABLES W, WX, WY, WZ;

\$include restricoes1

EQUATIONS

CUSTO define a funcao objetiva

SUPORTE(I,KK) custo de suportes para componentes i

EQ01(I)

EQ02(I)

EQ03(I)

EQ04(I)

EQ05(I)

EQ06(I)

EQ07(I,J)

EQ08(I,J)

EQ09(I,J)

EQ10(I,J)

EQ11(I,J)

EQ12(I,J)

EQ13(I,J)

EQ14(I,J)

EQ15(I,J)

EQ16(P)

EQ17(P)

EQ18(P)

EQ18a

EQ18b

EQ19(K)

EQ20(K)

EQ21(K)

EQ22(I)

EQ23(I,J) ;

CUSTO .. T =e= 2*CPER*(XX+YY) + SUM(I, CS(I))
 + SUM(K,CP(K)*(LXP(K) + LXN(K) + LYP(K) + LYN(K) + LZP(K) + LZN(K))) ;

SUPORTE(I,KK) .. CS(I) =g= CSA(I,KK)*(Z(I)-C(I)/2) + CSB(I,KK);

EQ01(I) .. XX =g= X(I) + 0.5*A(I)*(W(I,"1")+W(I,"3")+W(I,"5")+W(I,"7"))
 + 0.5*B(I)*(W(I,"2")+W(I,"4")+W(I,"6")+W(I,"8"));

EQ02(I) .. YY =g= Y(I) + 0.5*B(I)*(W(I,"1")+W(I,"3")+W(I,"5")+W(I,"7"))
 + 0.5*A(I)*(W(I,"2")+W(I,"4")+W(I,"6")+W(I,"8"));

EQ03(I) .. ZZ =g= Z(I) + 0.5*C(I);

EQ04(I) .. X(I) =g= 0.5*A(I)*(W(I,"1")+W(I,"3")+W(I,"5")+W(I,"7"))
 + 0.5*B(I)*(W(I,"2")+W(I,"4")+W(I,"6")+W(I,"8"));

EQ05(I) .. Y(I) =g= 0.5*B(I)*(W(I,"1")+W(I,"3")+W(I,"5")+W(I,"7"))
 + 0.5*A(I)*(W(I,"2")+W(I,"4")+W(I,"6")+W(I,"8"));

EQ06(I)\$((ORD(I) NE 12) AND (ORD(I) NE 13) AND (ORD(I) NE 14)) .. Z(I) =g=
 0.5*C(I);

EQ07(I,J)\$ (ORD(I) LT ORD(J)) ..

DX(I,J) =g= (0.5 * A(I) * (W(I,"1")+W(I,"3")+W(I,"5")+W(I,"7"))
 + 0.5*B(I)*(W(I,"2")+W(I,"4")+W(I,"6")+W(I,"8"))
 + 0.5*A(J)*(W(J,"1")+W(J,"3")+W(J,"5")+W(J,"7"))
 + 0.5*B(J)*(W(J,"2")+W(J,"4")+W(J,"6")+W(J,"8"))
 + (DH(I,J)+M(I,J)) * (WX(I,J)+WX(J,I)) - M(I,J))-DX(J,I);

EQ08(I,J)\$ (ORD(I) LT ORD(J)) ..

$$\begin{aligned}
DY(I,J) = & g = (0.5 * B(I) * (W(I,"1")+W(I,"3")+W(I,"5")+W(I,"7"))) \\
& + 0.5*A(I)*(W(I,"2")+W(I,"4")+W(I,"6")+W(I,"8")) \\
& + 0.5*B(J)*(W(J,"1")+W(J,"3")+W(J,"5")+W(J,"7")) \\
& + 0.5*A(J)*(W(J,"2")+W(J,"4")+W(J,"6")+W(J,"8")) \\
& + (DH(I,J)+M(I,J)) * (WY(I,J)+WY(J,I)) - M(I,J)-DY(J,I);
\end{aligned}$$

EQ09(I,J)\$(ORD(I) LT ORD(J)) ..

$$DZ(I,J) = g = ((DV(I,J) + 0.5*C(I) + 0.5*C(J))*(WZ(I,J)+WZ(J,I)))-DZ(J,I) ;$$

EQ10(I,J)\$(ORD(I) NE ORD(J)) ..

$$DX(I,J) = l = MM*(1-WX(J,I));$$

EQ11(I,J)\$(ORD(I) NE ORD(J)) ..

$$DY(I,J) = l = MM*(1-WY(J,I));$$

EQ12(I,J)\$(ORD(I) NE ORD(J)) ..

$$DZ(I,J) = l = MM*(1-WZ(J,I));$$

EQ13(I,J)\$(ORD(I) LT ORD(J)) .. $X(I) - X(J) - DX(I,J) + DX(J,I) = e = 0 ;$

EQ14(I,J)\$(ORD(I) LT ORD(J)) .. $Y(I) - Y(J) - DY(I,J) + DY(J,I) = e = 0 ;$

EQ15(I,J)\$(ORD(I) LT ORD(J)) .. $Z(I) - Z(J) - DZ(I,J) + DZ(J,I) = e = 0 ;$

EQ16(P) .. $XN(P) = e = \text{SUM}(I\$PI(P,I), X(I)$

$$\begin{aligned}
& + NPOSI(P,I,'FX')*0.5*A(I)*(W(I,"1")-W(I,"3")) \\
& + W(I,"5")-W(I,"7")) + NPOSI(P,I,'FY')*0.5*B(I)*(-W(I,"2") \\
& + W(I,"4")-W(I,"6")+W(I,"8"))) ;
\end{aligned}$$

EQ17(P) .. $YN(P) = e = \text{SUM}(I\$PI(P,I), Y(I)$

$$\begin{aligned}
& + NPOSI(P,I,'FY')*0.5*B(I)*(W(I,"1")-W(I,"3")-W(I,"5")+W(I,"7")) \\
& + NPOSI(P,I,'FX')*0.5*A(I)*(+W(I,"2")-W(I,"4")-W(I,"6")+W(I,"8"))) ;
\end{aligned}$$

EQ18(P) .. ZN(P) =e= SUM(I\$PI(P,I), Z(I) + NPOSI(P,I,'FZ')*0.5*C(I)) ;

EQ18a .. XN("32") =e= XN("33") ;

EQ18b .. YN("32") =e= YN("33") ;

EQ19(K) .. SUM(P\$KS(K,P), XN(P)) - SUM(P\$KT(K,P), XN(P)) - LXP(K) + LXN(K)
=e= 0 ;

EQ20(K) .. SUM(P\$KS(K,P), YN(P)) - SUM(P\$KT(K,P), YN(P)) - LYP(K) + LYN(K)
=e= 0 ;

EQ21(K) .. SUM(P\$KS(K,P), ZN(P)) - SUM(P\$KT(K,P), ZN(P)) - LZP(K) + LZN(K)
=e= 0 ;

EQ22(I) .. SUM(L, W(I,L)) =e= 1 ;

EQ23(I,J)\$ (ORD(I) LT ORD(J)) ..

WX(I,J) + WX(J,I) + WY(I,J) + WY(J,I) + WZ(I,J) + WZ(J,I) =e= 1 ;

MODEL LAYOUT /ALL/ ;

layout.optfile = 1;

OPTION MIP = CPLEX ;

\$include opcoes

\$offsymxref

SOLVE LAYOUT USING MIP MINIMIZING T ;

DISPLAY XX.L, YY.L, ZZ.L, X.L, Y.L, Z.L, W.L, WX.L, WY.L, WZ.L ,CS.L ;

Listagem dos dados utilizados e incluídos no programa pelo comando “\$include”, para o programa do estudo de caso 01.

\$include elementos

OS ELEMENTOS I e J REPRESENTAM:

- 1- Pulper
- 2- Bomba 01
- 3- Tanque 01
- 4- Bomba 03
- 5- Separador centrifugo
- 6- Caixa de Nivel 01
- 7- Pre Refinador
- 8- Tanque 04
- 9- Bomba 06
- 10- Refinador
- 11- Caixa de Nivel 02
- 12- Tanque de Diluicao
- 13- Bomba de Mistura
- 14- Depurador Vertical
- 15- Maquina de Papel

\$include sets

SETS

I	componentes	/1*15/
K	tubos	/1*16/
P	nozzle	/1*34/
L	rotacoes	/1*8/
KK	auxiliar	/1*4/

\$include bocalpartida

KS(K,P) /1.2

2.4
3.6
4.8
5.10
6.12
7.14
8.16
9.18
10.20
11.22
12.24
13.26
14.28
15.30
16.32/

\$includa bocalchegada

KT(K,P) / 1.3

2.5
3.7
4.9
5.11
6.13
7.15
8.17
9.19
10.21
11.23
12.25
13.27
14.29
15.31
16.33/

\$include bocalcomponentes

PI(P,I) / 1.1

2.1

3.2

4.2

5.3

6.3

7.4

8.4

9.5

10.5

11.6

12.6

15.6

16.6

13.7

14.7

17.8

18.8

19.9

20.9

21.10

22.10

23.11

24.11

25.12

26.12

32.12

27.13

28.13

29.14

30.14

31.15

33.15

34.15/;

\$include scalars

SCALARS

CPER custo por unidade de perimetro /300.00/

MM um numero grande considerado no modelo /100.00/ ;

\$include largura

PARAMETERES

A(I) dimensoes dos componentes i (m)

/1	3.00
2	1.00
3	4.00
4	0.80
5	0.50
6	0.50
7	0.80
8	3.00
9	0.50
10	1.20
11	0.50
12	2.00
13	1.40
14	1.60
15	3.30/

\$include comprimento

PARAMETRES

B(I) dimensoes dos componentes i (m)

/1	3.00
2	1.75

3	6.50
4	1.40
5	0.45
6	1.90
7	2.10
8	4.50
9	1.35
10	3.30
11	1.10
12	2.50
13	3.00
14	2.00
15	21.50/

\$include altura

PARAMETERES

C(I) dimensoes dos componentes i(m)

/1	5.50
2	1.00
3	5.50
4	0.80
5	1.50
6	0.90
7	1.30
8	5.50
9	1.00
10	1.30
11	0.90
12	5.50
13	1.40
14	2.50
15	5.50/

\$includetubotubo

PARAMETERES

CP(K) custo por unidade de comprimento para o tubo k (dolares por m)

/1	207.962
2	89.482
3	68.468
4	89.482
5	68.468
6	68.468
7	68.468
8	68.468
9	68.468
10	89.482
11	68.468
12	68.468
13	68.468
14	89.482
15	251.686
16	27.351/

\$includedistanciahorizontal

TABLE Dh(I,J) distancias minimas horizontais de segurança entre os componentes (m)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15								
1		0.5	3.5	2.0	1.5	2.0	2.0	2.5	2.0	3.0	3.0
2.5	2.0	2.5	3.0								

8	3.0	4.0	2.0	4.0	2.5	4.0	4.0		4.0	4.0	4.0
4.0	4.0	2.5	3.0								
9	2.5	3.5	4.0	3.5	3.0	3.4	3.5	4.0		3.5	3.4
4.0	3.5	2.5	3.0								
10	3.0	3.5	4.0	4.0	3.0	3.4	3.5	4.0	3.5		3.4
1.0	3.5	2.5	3.0								
11	5.0	5.5	4.4	5.5	3.0	3.4	3.4	4.0	3.4	3.4	
4.0	3.4	2.5	3.0								
12	3.0	4.0	2.0	4.0	2.5	4.0	3.4	4.0	4.0	1.0	4.0
	1.0	1.0	0.0								
13	2.5	3.5	4.0	3.5	3.0	3.4	3.5	4.0	3.5	3.5	3.4
1.0		2.5	3.0								
14	3.5	2.5	2.0	2.5	2.5	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
1.0	2.5		3.0								
15	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
0.0	3.0	3.0									

\$include nozzles

TABLE NPOSI (P,I,*) posicoes dos "nozzles"

	FX	FY	FZ
1.1	0	0	1
2.1	-1	0	0
3.2	1	0	0
4.2	0	0	1
5.3	0	0	1
6.3	1	0	0

7.4	1	0	0
8.4	0	0	1
9.5	0	0	1
10.5	0	0	1
11.6	1	0	0
12.6	1	0	0
15.6	-1	0	0
16.6	1	0	0
13.7	1	0	0
14.7	0	0	1
17.8	0	0	1
18.8	0	1	0
19.9	1	0	0
20.9	-1	0	0
21.10	1	0	0
22.10	-1	0	0
23.11	1	0	0
24.11	-1	0	0
25.12	-1	0	0
26.12	1	0	0
32.12	0	0	1
27.13	-1	0	0
28.13	1	0	0
29.14	0	0	1
30.14	0	0	-1
31.15	-1	0	0
33.15	0	0	-1
34.15	1	0	0

 $\$include$ restricoes

WX.fx('1','2') = 1;
WX.fx('1','3') = 1;
WX.fx('1','4') = 1;
WX.fx('1','5') = 1;
WX.fx('1','6') = 1;
WY.fx('1','7') = 1;
WY.fx('1','8') = 1;
WY.fx('1','9') = 1;
WY.fx('1','10') = 1;
WY.fx('1','11') = 1;
WY.fx('1','12') = 1;
WY.fx('1','13') = 1;
WY.fx('1','14') = 1;
WY.fx('1','15') = 1;
WX.fx('2','3') = 1;
WX.fx('2','4') = 1;
WX.fx('2','5') = 1;
WX.fx('2','6') = 1;
WY.fx('2','7') = 1;
WY.fx('2','8') = 1;
WY.fx('2','9') = 1;
WY.fx('2','10') = 1;
WY.fx('2','11') = 1;
WY.fx('2','12') = 1;
WY.fx('2','13') = 1;
WY.fx('2','14') = 1;
WY.fx('2','15') = 1;
WX.fx('3','4') = 1;
WX.fx('3','5') = 1;
WX.fx('3','6') = 1;
WY.fx('3','7') = 1;
WY.fx('3','8') = 1;
WY.fx('3','9') = 1;
WY.fx('3','10') = 1;
WY.fx('3','11') = 1;
WY.fx('3','12') = 1;
WY.fx('3','13') = 1;
WY.fx('3','14') = 1;
WY.fx('3','15') = 1;
WX.fx('4','5') = 1;
WX.fx('4','6') = 1;
WY.fx('4','7') = 1;
WY.fx('4','8') = 1;
WY.fx('4','9') = 1;
WY.fx('4','10') = 1;

WY.fx('4','11') = 1;
WY.fx('4','12') = 1;
WY.fx('4','13') = 1;
WY.fx('4','14') = 1;
WY.fx('4','15') = 1;
WX.fx('5','6') = 1;
WY.fx('5','7') = 1;
WY.fx('5','8') = 1;
WY.fx('5','9') = 1;
WY.fx('5','10') = 1;
WY.fx('5','11') = 1;
WY.fx('5','12') = 1;
WY.fx('5','13') = 1;
WY.fx('5','14') = 1;
WY.fx('5','15') = 1;
WX.fx('6','7') = 1;
WY.fx('6','8') = 1;
WY.fx('6','9') = 1;
WY.fx('6','10') = 1;
WY.fx('6','11') = 1;
WY.fx('6','12') = 1;
WY.fx('6','13') = 1;
WY.fx('6','14') = 1;
WY.fx('6','15') = 1;
WY.fx('7','8') = 1;
WY.fx('7','9') = 1;
WY.fx('7','10') = 1;
WY.fx('7','11') = 1;
WY.fx('7','12') = 1;
WY.fx('7','13') = 1;
WY.fx('7','14') = 1;
WY.fx('7','15') = 1;
WX.fx('8','9') = 1;
WX.fx('8','10') = 1;
WX.fx('8','11') = 1;
WX.fx('8','12') = 1;
WX.fx('8','13') = 1;
WX.fx('8','14') = 1;
WY.fx('8','15') = 1;
WX.fx('9','10') = 1;
WX.fx('9','11') = 1;
WX.fx('9','12') = 1;
WX.fx('9','13') = 1;
WX.fx('9','14') = 1;
WY.fx('9','15') = 1;
WX.fx('10','11') = 1;
WX.fx('10','12') = 1;
WX.fx('10','13') = 1;
WX.fx('10','14') = 1;

```
WY.fx('10','15') = 1;  
WY.fx('11','12') = 1;  
WX.fx('11','13') = 1;  
WX.fx('11','14') = 1;  
WY.fx('11','15') = 1;  
WX.fx('12','13') = 1;  
WX.fx('12','14') = 1;  
WX.fx('12','15') = 1;  
WX.fx('13','14') = 1;  
WY.fx('13','15') = 1;  
WY.fx('14','15') = 1;
```

\$include opçoes

```
option limrow = 10000000 ;  
option reslim = 1000000000;  
option iterlim = 25000000;  
option optcr = 0.0;  
option work = 1000.0;
```

Para implementação do programa do Estudo de Caso 02, apenas as restrições foram diferentes.

\$include restricoes02

WX.fx('1','2') = 1;

WX.fx('1','3') = 1;

WX.fx('1','4') = 1;

WX.fx('1','5') = 1;

WX.fx('1','6') = 1;

WY.fx('1','7') = 1;

WY.fx('1','8') = 1;

WY.fx('1','9') = 1;

WY.fx('1','10') = 1;

WY.fx('1','11') = 1;

WY.fx('1','12') = 1;

WY.fx('1','13') = 1;

WY.fx('1','14') = 1;

WY.fx('1','15') = 1;

WX.fx('2','3') = 1;

WX.fx('2','4') = 1;

WX.fx('2','5') = 1;

WX.fx('2','6') = 1;

WY.fx('2','7') = 1;

WY.fx('2','8') = 1;

WY.fx('2','9') = 1;

WY.fx('2','10') = 1;

WY.fx('2','11') = 1;

WY.fx('2','12') = 1;

WY.fx('2','13') = 1;

WY.fx('2','14') = 1;

WY.fx('2','15') = 1;

WX.fx('3','4') = 1;

WX.fx('3','5') = 1;

WX.fx('3','6') = 1;

WY.fx('3','7') = 1;
WY.fx('3','8') = 1;
WY.fx('3','9') = 1;
WY.fx('3','10') = 1;
WY.fx('3','11') = 1;
WY.fx('3','12') = 1;
WY.fx('3','13') = 1;
WY.fx('3','14') = 1;
WY.fx('3','15') = 1;
WX.fx('4','5') = 1;
WX.fx('4','6') = 1;
WY.fx('4','7') = 1;
WY.fx('4','8') = 1;
WY.fx('4','9') = 1;
WY.fx('4','10') = 1;
WY.fx('4','11') = 1;
WY.fx('4','12') = 1;
WY.fx('4','13') = 1;
WY.fx('4','14') = 1;
WY.fx('4','15') = 1;
WZ.fx('6','5') = 1;
WZ.fx('5','7') = 1;
WY.fx('5','8') = 1;
WY.fx('5','9') = 1;
WY.fx('5','10') = 1;
WY.fx('5','11') = 1;
WY.fx('5','12') = 1;
WY.fx('5','13') = 1;
WY.fx('5','14') = 1;
WZ.fx('5','15') = 1;
WX.fx('6','7') = 1;
WY.fx('6','8') = 1;
WY.fx('6','9') = 1;
WY.fx('6','10') = 1;

WY.fx('6','11') = 1;
WY.fx('6','12') = 1;
WY.fx('6','13') = 1;
WY.fx('6','14') = 1;
WZ.fx('6','15') = 1;
WY.fx('7','8') = 1;
WY.fx('7','9') = 1;
WY.fx('7','10') = 1;
WY.fx('7','11') = 1;
WY.fx('7','12') = 1;
WY.fx('7','13') = 1;
WY.fx('7','14') = 1;
WY.fx('7','15') = 1;
WX.fx('8','9') = 1;
WX.fx('8','10') = 1;
WX.fx('8','11') = 1;
WX.fx('8','12') = 1;
WX.fx('8','13') = 1;
WX.fx('8','14') = 1;
WY.fx('8','15') = 1;
WX.fx('9','10') = 1;
WX.fx('9','11') = 1;
WX.fx('9','12') = 1;
WX.fx('9','13') = 1;
WX.fx('9','14') = 1;
WY.fx('9','15') = 1;
WZ.fx('11','10') = 1;
WZ.fx('10','12') = 1;
WX.fx('10','13') = 1;
WX.fx('10','14') = 1;
WY.fx('10','15') = 1;
WY.fx('11','12') = 1;
WX.fx('11','13') = 1;
WX.fx('11','14') = 1;

WY.fx('11','15') = 1;
WX.fx('12','13') = 1;
WX.fx('12','14') = 1;
WZ.fx('15','12') = 1;
WX.fx('13','14') = 1;
WZ.fx('15','13') = 1;
WZ.fx('15','14') = 1;

Para implementação do programa do Estudo de Caso 03, apenas as restrições foram diferentes.

\$include restricoes03

WZ.fx('1','2') = 1;
WX.fx('1','3') = 1;
WX.fx('1','4') = 1;
WX.fx('1','5') = 1;
WX.fx('1','6') = 1;
WY.fx('1','7') = 1;
WY.fx('1','8') = 1;
WY.fx('1','9') = 1;
WY.fx('1','10') = 1;
WY.fx('1','11') = 1;
WY.fx('1','12') = 1;
WY.fx('1','13') = 1;
WY.fx('1','14') = 1;
WY.fx('1','15') = 1;
WX.fx('2','3') = 1;
WX.fx('2','4') = 1;
WX.fx('2','5') = 1;
WX.fx('2','6') = 1;
WY.fx('2','7') = 1;
WY.fx('2','8') = 1;
WY.fx('2','9') = 1;

WY.fx('2','10') = 1;
WY.fx('2','11') = 1;
WY.fx('2','12') = 1;
WY.fx('2','13') = 1;
WY.fx('2','14') = 1;
WY.fx('2','15') = 1;
WZ.fx('3','4') = 1;
WX.fx('3','5') = 1;
WX.fx('3','6') = 1;
WY.fx('3','7') = 1;
WY.fx('3','8') = 1;
WY.fx('3','9') = 1;
WY.fx('3','10') = 1;
WY.fx('3','11') = 1;
WY.fx('3','12') = 1;
WY.fx('3','13') = 1;
WY.fx('3','14') = 1;
WY.fx('3','15') = 1;
WX.fx('4','5') = 1;
WX.fx('4','6') = 1;
WY.fx('4','7') = 1;
WY.fx('4','8') = 1;
WY.fx('4','9') = 1;
WY.fx('4','10') = 1;
WY.fx('4','11') = 1;
WY.fx('4','12') = 1;
WY.fx('4','13') = 1;
WY.fx('4','14') = 1;
WY.fx('4','15') = 1;
WZ.fx('6','5') = 1;
WZ.fx('5','7') = 1;
WY.fx('5','8') = 1;
WY.fx('5','9') = 1;
WY.fx('5','10') = 1;

WY.fx('5','11') = 1;
WY.fx('5','12') = 1;
WY.fx('5','13') = 1;
WY.fx('5','14') = 1;
WZ.fx('5','15') = 1;
WX.fx('6','7') = 1;
WY.fx('6','8') = 1;
WY.fx('6','9') = 1;
WY.fx('6','10') = 1;
WY.fx('6','11') = 1;
WY.fx('6','12') = 1;
WY.fx('6','13') = 1;
WY.fx('6','14') = 1;
WZ.fx('6','15') = 1;
WY.fx('7','8') = 1;
WY.fx('7','9') = 1;
WY.fx('7','10') = 1;
WY.fx('7','11') = 1;
WY.fx('7','12') = 1;
WY.fx('7','13') = 1;
WY.fx('7','14') = 1;
WY.fx('7','15') = 1;
WZ.fx('8','9') = 1;
WX.fx('8','10') = 1;
WX.fx('8','11') = 1;
WX.fx('8','12') = 1;
WX.fx('8','13') = 1;
WX.fx('8','14') = 1;
WY.fx('8','15') = 1;
WX.fx('9','10') = 1;
WX.fx('9','11') = 1;
WX.fx('9','12') = 1;
WX.fx('9','13') = 1;
WX.fx('9','14') = 1;

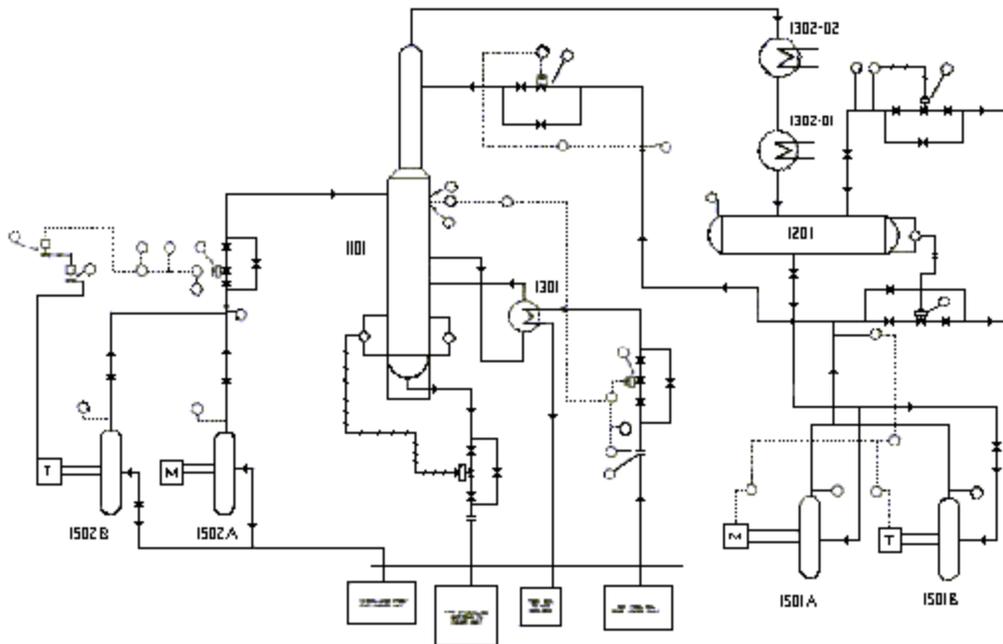
WY.fx('9','15') = 1;
WZ.fx('11','10') = 1;
WZ.fx('10','12') = 1;
WX.fx('10','13') = 1;
WX.fx('10','14') = 1;
WY.fx('10','15') = 1;
WY.fx('11','12') = 1;
WX.fx('11','13') = 1;
WX.fx('11','14') = 1;
WY.fx('11','15') = 1;
WX.fx('12','13') = 1;
WX.fx('12','14') = 1;
WZ.fx('15','12') = 1;
WX.fx('13','14') = 1;
WY.fx('13','15') = 1;
WY.fx('14','15') = 1;

ANEXO 2

Unidade Petroquímica

A unidade petroquímica, que é apresentada na Figura A.2.1, cuja planta consiste de 9 componentes principais (Tabela A.2.1). Porém, para facilitar a modelagem, bem como a programação em GAMS, os componentes desta unidade foram rearranjados, conforme se pode observar na Tabela.

Figura A.2.1 - Unidade petroquímica com nove componentes principais.



Fonte: GUIARDELLO, 1993.

A seguir temos as tabelas referentes aos dados obtidos em trabalhos anteriores.

Tabela A.2.1 - Dimensões e áreas dos componentes para a unidade petroquímica.

Componentes	A _i (m)	B _i (m)	C _i (m)	Área _i (m ²)
1	1,88	1,88	22,50	3,5344
2	1,41	5,56	1,41	7,8396
3	0,77	7,03	0,77	5,4131
4	0,47	5,65	2,14	2,6555
5	1,41	2,44	0,47	1,3254
6	1,80	3,00	0,75	2,7000

Fonte: GUIARDELLO (1993).

Tabela A.2.2 - Distâncias mínimas entre os componentes para a unidade petroquímica.

Componente i	Componente j	D_{ij}^h (m)	D_{ij}^v (m)
1	2	6,00	4,80
1	3	2,40	1,80
1	4	6,00	4,80
1	5	2,40	1,20
1	6	2,40	1,20
2	3	2,40	2,70
2	4	2,40	2,10
2	5	4,50	4,20
2	6	4,50	4,20
3	4	1,50	1,80
3	5	1,50	1,80
3	6	1,50	1,80
4	5	1,50	1,20
4	6	1,50	1,20
5	6	1,50	0,90

Fonte: GUIRARDELLO (1993).

Tabela A.2.3 - Posicionamento dos bocais para a unidade petroquímica.

Componente i	j	p	F_{ji}^x	F_{ji}^y	F_{ji}^z
1	1	1	1,00	0,00	0,21
	2	2	0,00	-1,00	-0,89
	3	3	0,00	0,00	1,00
	4	4	1,00	0,00	0,94
	5	5	0,00	1,00	-0,57
	6	6	0,00	1,00	-0,65
2	1	7	0,00	0,69	1,00
	2	8	0,00	-0,69	1,00
	3	9	0,00	-0,77	-1,00
3	1	10	0,00	0,00	-1,00
	2	11	0,00	-0,69	1,00
	3	12	0,00	0,69	1,00
	4	13	0,00	0,92	-1,00
	5	14	0,00	0,92	1,00
4	1	15	0,00	-0,68	1,00
	2	16	0,00	-0,68	-1,00
	3	17	0,00	-0,87	-1,00
	4	18	0,00	-0,87	1,00
5	1	19	-1,00	-0,68	1,00
	2	20	-1,00	0,91	1,00
	3	21	-1,00	-0,80	0,00
	4	22	-1,00	0,80	0,00
6	1	23	-1,00	0,92	1,00
	2	24	-1,00	-0,60	1,00
	3	25	-1,00	0,76	0,00
	4	26	-1,00	-0,76	0,00

Fonte: GUIARDELLO (1993).

Tabela A.2.4 - Dados para os tubos na otimização do layout da unidade petroquímica.

Tubo k	$k_s(k)$	$k_t(k)$	C_k^p
1	23	1	5,249
2	24	1	5,249
3	3	15	26,247
4	19	4	5,249
5	20	4	5,249
6	5	10	39,042
7	11	6	39,042
8	12	6	39,042
9	7	16	9,843
10	9	21	14,764
11	9	22	14,764

Fonte: GUIARDELLO (1993).

Tabela A.2.5 - Custo dos suportes para cada componente da unidade petroquímica.

Custos	Planta Petroquímica
Terreno	298.43
Suporte	16,647.67
Tubulação	2,292.36
Total	US\$

Tabela A.2.6 - Comprimento dos tubos, em metros, obtidos pelo GAMS, para a unidade petroquímica.

TUBOS	LXP	LXN	LYP	LYN	LZP	LZN
1	2,40		1,72			12,862
2	2,40			0,560		12,862
3		7,175	0,256		11,90	
4	6,00			0,374		21,355
5	6,00		1,566			21,355
6		2,575		2,785	4,837	
7	5,00		2,785			3,167
8	0,150		2,785			3,167
9	0,470		3,794			2,100
10	0,705			0	4,715	
11	0,705			1,952	4,715	

Tabela A.2.7 - Orientações dos componentes obtidas para a unidade petroquímica, conforme a estratégia depth first.

$W_{i,l}$

1,1

2,7

3,2

4,7

5,1

6,1

Tabela A.2.8 - Orientações dos componentes obtidas para a unidade petroquímica, conforme a estratégia best bound.

$W_{i,l}$
1,1
2,1
3,2
4,1
5,1
6,1

Tabela A.2.9 - Posições do centro dos componentes obtidas para a unidade petroquímica.

Componentes	depth first		
	x_i	y_i	z_i
1	0,940	1,160	11,250
2	8,585	2,780	5,655
3	3,515	4,885	0,385
4	8,115	2,825	9,530
5	8,585	1,615	0,235
6	5,180	1,500	0,375

Tabela A.2.10 - Posições relativas entre os componentes obtidos para a unidade petroquímica, conforme a estratégia best bound.

w^x_{ij}	w^y_{ij}	w^z_{ij}
2,1	3,1	2,3
4,1	3,5	2,5
4,6	3,6	2,6
5,1		4,2
5,6		4,3
6,1		4,5

Tabela A.2.11 - Número de equações e variáveis

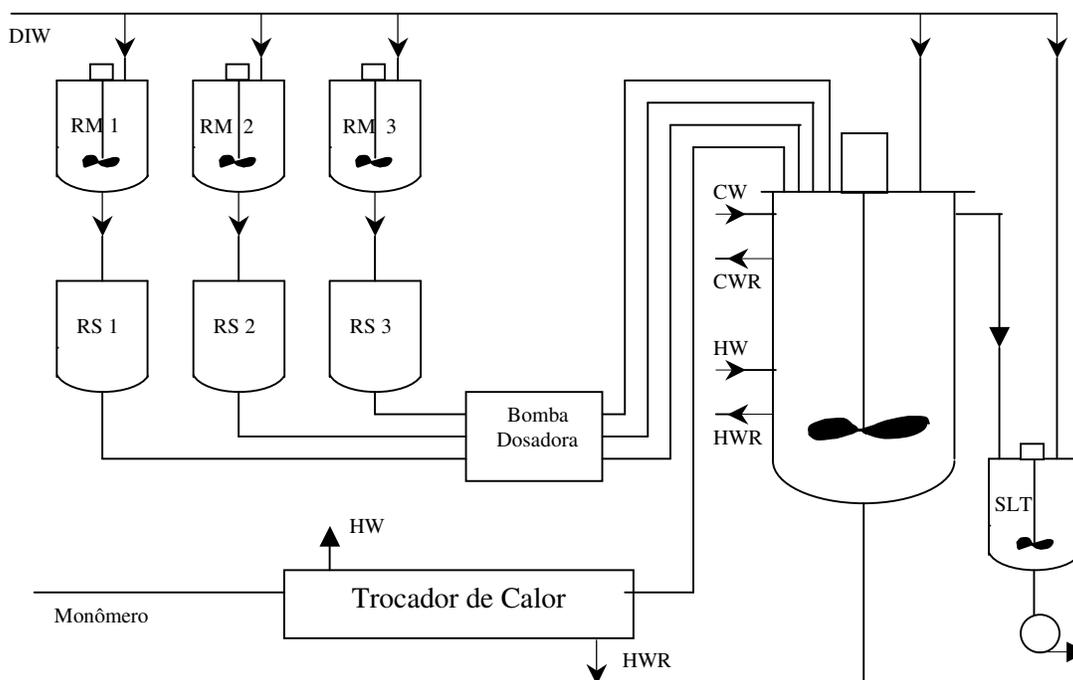
GAMS / CPLEX 6.0	
Bloco de Equações	25
Bloco de Variáveis	24
Elementos não-zero	2.551
Equações Simples	418
Variáveis Simples	400
Variáveis Discretas	134

ANEXO 3

Unidade de Polimerização

A planta de polimerização (GUNN, 1970) possui treze componentes principais – figura A.3.1 –, no entanto, eles foram rearranjados em pequenos grupos devido à sua similaridade, resultando em 7 componentes.

Figura A.3.1 - Planta de polimerização com treze componentes principais.



Fonte: GUNN, 1970.

Tabela A.3.1 - Dimensões e áreas dos componentes para a unidade de polimerização.

Componentes	A_i (m)	B_i (m)	C_i (m)	Área_i (m ²)
1	3,90	1,20	1,40	4,6800
2	4,95	1,60	2,05	7,9200
3	1,55	1,45	0,50	2,2475
4	3,15	3,15	4,10	9,9225
5	1,65	1,65	2,05	3,3000
6	0,75	1,80	0,75	1,3500
7	0,30	3,90	0,30	1,1700

Tabela A.3.2 - Dados para os tubos na otimização do layout da planta de polimerização.

Tubo k	$k_s(k)$	$k_t(k)$	C_k^P
1	4	7	11,601
2	5	8	11,601
3	6	9	11,601
4	10	15	11,601
5	11	14	11,601
6	12	13	11,601
7	16	21	6,186
8	17	20	6,186
9	18	19	6,186
10	35	24	46,014

11	23	29	46,014
12	31	32	6,186

Tabela A.3.3 - Distâncias mínimas entre os componentes para a unidade de polimerização.

Componente i	Componente j	D_{ij}^h (m)	D_{ij}^v (m)
1	2	1,50	1,20
1	3	2,40	1,50
1	4	6,00	3,50
1	5	1,50	1,20
1	6	2,40	1,50
1	7	2,40	1,80
2	3	2,40	1,50
2	4	6,00	3,50
2	5	1,50	1,20
2	6	2,40	1,50
2	7	2,40	1,80
3	4	2,40	1,80
3	5	2,40	1,50
3	6	1,50	0,90
3	7	1,50	1,80
4	5	1,50	3,50
4	6	2,40	1,80
4	7	2,40	3,50
5	6	2,40	1,20
5	7	2,40	1,80

6	7	1,50	1,80
---	---	------	------

Tabela A.3.4 - Posicionamento dos bocais para a unidade de polimerização.

componente i	P	F_{ji}^x	F_{ji}^y	F_{ji}^z
1	1	0,00	-0,50	1,00
	2	0,00	0,10	1,00
	3	0,00	0,70	1,00
	4	0,00	-0,60	-1,00
	5	0,00	0,00	-1,00
	6	0,00	0,60	-1,00
	7	0,00	-0,60	1,00
	8	0,00	0,00	1,00
	9	0,00	0,60	1,00
2	10	0,00	-0,60	-1,00
	11	0,00	0,00	-1,00
	12	0,00	0,60	-1,00
	13	0,00	-1,00	0,50
	14	0,00	-1,00	0,00
	15	0,00	-1,00	-0,50
	16	0,00	1,00	0,50
	17	0,00	1,00	0,00
3	18	0,00	1,00	-0,50
	19	0,50	-0,50	1,00
	20	0,00	-0,50	1,00
	21	-0,50	-0,50	1,00
	22	0,00	0,70	1,00
4	23	0,00	1,00	0,70
	24	0,00	-0,70	1,00
	25	0,00	-1,00	0,70
	26	0,00	-1,00	0,40
	27	0,00	-1,00	-0,40
	28	0,00	-1,00	-0,70
	29	0,00	-0,70	1,00

5	30	0,00	0,70	1,00
	31	0,00	0,00	-1,00
	32	0,00	0,00	1,00
6	33	0,00	0,70	-1,00
	34	0,00	-1,00	0,00
	35	0,00	1,00	0,00
7	36	0,00	-0,70	1,00
	37	0,00	0,70	-1,00

Tabela A.3.5 - Custos de terreno, suportes e tubulação para a planta de polimerização.

Custos	Planta de Polimerização
Terreno	11,044.01
Suportes	10,778.82
Tubulação	801.85
Total	US\$22,624.68

Tabela A.3.6 - Orientações dos componentes obtidas para a planta de polimerização, conforme a estratégia depth first.

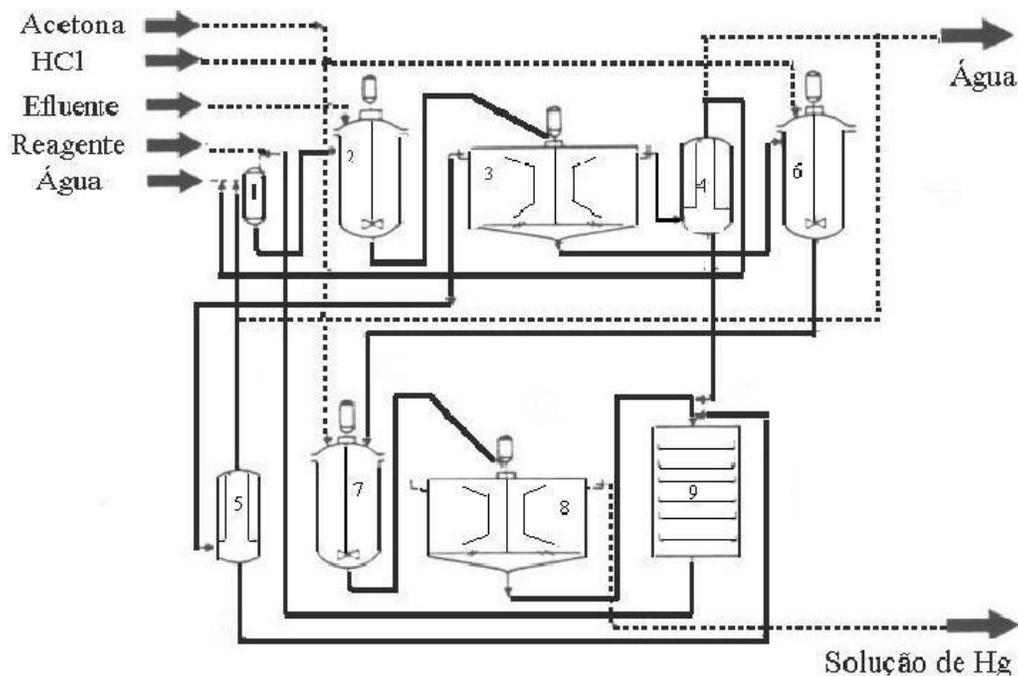
$W_{i,l}$
1,4
2,8
3,7
4,3
5,2
6,1
7,1

ANEXO 4

Unidade de Recuperação de Mercúrio a partir de efluentes eletrolíticos

A planta de recuperação de mercúrio a partir de efluentes eletrolíticos (AMORESE, CENA E MUSTACCHI, 1977), apresentada na Figura A.4.1, contém 9 componentes principais que não puderam ser rearranjados como nos outros casos de estudo, aumentando, assim, a complexidade computacional para a resolução do problema modelado em MILP.

Figura A.4.1 - Planta de recuperação de mercúrio a partir de efluentes eletrolíticos.



Fonte: AMORESE, CENA E MUSTACCHI, 1977.

Tabela A.4.1 - Dimensões estimadas dos componentes para a planta de recuperação de mercúrio.

Componentes	A _i	B _i	C _i	Área _i
	(m)	(m)	(m)	(m ²)
1	0,90	0,90	1,20	1,80
2	2,00	2,00	4,40	4,00
3	3,25	3,25	1,90	6,50
4	1,40	1,40	3,00	2,80
5	1,40	1,40	3,00	2,80
6	2,00	2,00	4,40	4,00
7	2,00	2,00	4,40	4,00
8	3,25	3,25	1,90	6,50
9	2,60	2,60	3,80	5,20

Tabela A.4.2 - Dados para os tubos na otimização do layout da planta de recuperação de mercúrio.

Tubo k	$k_s(k)$	$k_t(k)$	C_k^p
1	1	4	5,00
2	11	3	5,00
3	16	3	7,50
4	23	2	5,00
5	5	6	25,00
6	9	10	20,00
7	7	15	20,00
8	17	22	7,50
9	21	22	15,00
10	19	20	25,00
11	14	18	25,00
12	8	13	15,00
13	12	22	7,50

Tabela A.4.3 - Posicionamento dos bocais para a planta de recuperação de mercúrio.

Componente i	P	F_{ji}^x	F_{ji}^y	F_{ji}^z
1	1	0,00	0,00	-1,00
	2	-0,50	0,25	1,00
	3	0,50	-1,00	0,65
2	4	0,50	-1,00	0,50
	5	0,00	0,00	-1,00
	6	0,00	0,00	1,00
3	7	0,50	-1,00	0,85
	8	0,00	0,00	-1,00
	9	-0,50	1,00	0,85
4	10	0,50	-1,00	-0,75
	11	0,00	0,00	1,00
	12	0,00	0,00	-1,00
6	13	0,00	-1,00	0,70
	14	0,00	0,00	-1,00
	15	0,50	-1,00	-0,75
5	16	0,00	0,00	1,00
	17	0,00	0,00	-1,00
7	18	0,50	0,65	1,00
	19	0,00	0,00	-1,00
8	20	0,00	0,00	1,00
	21	0,00	0,00	-1,00
9	22	0,00	0,00	1,00
	23	0,00	-0,10	-1,00

Tabela A.4.4 - Distâncias mínimas entre os componentes para a planta de recuperação de mercúrio.

Componentes	Componente j	D_{ij}^h (m)	D_{ij}^v (m)	
Misturador	2	4,50	2,40	
	3	1,50	1,50	
	4	1,50	1,50	
	5	1,50	1,50	
	6	4,50	2,40	
	7	4,50	2,40	
	8	1,50	1,50	
	9	1,50	1,50	
	Reatores	3	4,50	2,40
4		4,50	2,40	
5		4,50	2,40	
6		2,40	1,50	
7		2,40	1,50	
8		4,50	2,40	
9		4,50	2,40	
Decantadores		4	1,50	1,50
		5	1,50	1,50
	6	4,50	2,40	
	7	4,50	2,40	
	8	1,50	1,50	
	9	2,40	1,50	
	Filtros	5	1,50	1,50
		6	4,50	2,40
		7	4,50	2,40
8		2,40	1,50	
9		1,50	1,50	

Tabela A.4.5 - Custos de terreno, suportes e tubulação para a planta de recuperação de mercúrio.

Custos	Planta de Mercúrio
Terreno	20,300.52
Suportes	15,549.02
Tubulação	1,763.56
Total	US\$37,613.10

Tabela A.4.6 - Orientações dos componentes obtidas para a planta de recuperação de mercúrio.

$W_{i,l}$
1,1
2,6
3,4
4,8
5,3
6,3
7,1
8,1
9,5

Tabela A.4.7 - Posições do centro dos componentes obtidas para a planta de recuperação de mercúrio.

Posições Relativas (m)	Componentes								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x_i	6,950	1,000	8,125	11,950	6,850	18,150	17,800	10,675	3,350
y_i	4,550	8,425	8,125	8,587	1,900	5,400	1,000	1,625	1,625
z_i	0,600	2,200	0,950	1,500	1,500	2,200	2,200	3,250	1,900

Tabela A.4.8 - Posições relativas entre os componentes obtidos para a planta de recuperação de mercúrio, para qualquer estratégia e modelo.

	w_{ij}^x				w_{ij}^y		
	1,2	5,9	6,8	7,9	1,5	3,7	4,7
	1,9	6,1	6,9	8,1	2,5	3,8	4,8
	3,2	6,2	7,1	8,2	2,9	3,9	6,7
	4,2	6,3	7,2	8,5	3,1	4,1	
	4,3	6,4	7,5	8,9	3,5	4,5	
	4,9	6,5	7,8				

Tabela A.4.9 - O número de equações e variáveis usadas em cada modelo, para a planta de recuperação de mercúrio.

GAMS / CPLEX 6.0	
Bloco de Equações	25
Bloco de Variáveis	24
Elementos não-zero	4.857
Equações Simples	784
Variáveis Simples	691
Variáveis Discretas	268
