



# Otimização do posicionamento dos equipamentos na fabricação de papel tissue

*Equipment positioning optimization in tissue paper manufacturing*

**Autores:** Daniela M.Devienne Drummond<sup>1</sup>  
Reginaldo Guirardello<sup>2</sup>

**Palavras-chave:** Otimização, Papel Tissue, Layout, MILP, GAMS.

## 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 categoria de papéis Tissue 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,

## Abstract

*The main objective of an industrial layout is the definition and integration of the productive elements defined by the company. More than these aspects, the layout definition is related to the departments arrangement, cells and machines, in the plant or its offices. Due to the geometrical and combinatory aspects of this problem, the solution can achieve a high level of complexity as more and more variables are added to the system. Besides, the industrial layout has quantitative and qualitative factors that can turn the modeling and analysis a very difficult task. One important case for plant layout is the tissue paper plant. It encloses the toilet papers, that answer for 80% of the production, the towels (16%) and Napkins (4%), besides the so called "institutional line" for attendance of big consumers, as fast-food nets, hospitals, offices, industries. Brazil contributes with 3.1% of the world-wide production and is the 8th world-wide producer of tissue paper. The objective of this work was the application of a mathematical model to obtain the optimal equipment layout in the fabrication of tissue paper. The model used was based on a mixed integer linear model, the software used for the modeling was GAMS (General Algebraic Modeling System) with the CPLEX solver, which is designed to construct and to solve very large and complex mathematical programming models to obtain the washing efficiency and the filtration capacity.*

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

os, indústrias, etc. O Brasil contribui com 3,1% da produção mundial, e é o 8º em produção mundial de papel tissue. Este trabalho tem como objetivo a utilização da modelagem matemática

para otimização dos componentes no posicionamento de uma planta de fabricação de papel. O modelo a ser utilizado será em MILP (Programação Mista Inteira e Linear), o software para a

## Referências dos autores:

- 1 - Faculdade de Engenharia Química - Departamento de Processos Químicos - Universidade de Campinas. E-mail: dmdd@feq.unicamp.br
- 2 - Faculdade de Engenharia Química - Departamento de Processos Químicos - Universidade de Campinas. E-mail: guira@feq.unicamp.br

modelagem será o GAMS (General Algebraic Modeling System); é designado à construção e solução de grandes e complexos modelos de programação matemática.

## INTRODUÇÃO

### 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.

Os espécimes mais antigos 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 escre-

ver 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 artesãos chineses pelos mouros em Samarkanda no ano de 751, a fabricação de papel chega a Bagdá e Damasco. Com a expansão muçulmana, 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 à 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 pa-

pel 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 lançamen-

to 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).

O objetivo deste trabalho é utilizar a modelagem matemática para otimização dos componentes no posicionamento de uma planta de fabricação de papel, através da equação desenvolvida por GUIRARDELLO (1993) utilizando-se do pacote comercial GAMS/CPLEX 7.5.

#### **Definição e objetivos do 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 combinatórios 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;

**Tabela 1 - Evolução da produção e destino**

Evolução da Produção e Destino do Papel				
	2003		2004	
Distribuição	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

- 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.

#### 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 2,8% da produção mundial, participação que vem se mantendo desde 1990. Além disso, o País é o 9º produtor mundial de papel sanitário. As cinco maiores empresas produtoras - Kimberly Clark, Santher, Melhoramentos, Manikraft e Mili - concentram 54% 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 2002, a produção desse papel cresceu 8,4% para um aumento de demanda de 9,2%. A partir de 1993, as taxas

médias de crescimento anual do consumo e da produção foram de, respectivamente, 6,4% e 4,7%, com expansões expressivas em 1995 e 1996, influenciadas pelo aumento de renda da população. A demanda interna tem sido atendida pela expansão correspondente à produção.

#### 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 papelcartão. 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 foi 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 movimenta cerca de 100 milhões de toneladas anualmente, sendo imprimir e escrever, embalagem, imprensa e papelcartão 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 papelcartão que representam, respectivamente, 1,6%, 2,2% e 0,8% do comércio mundial das respectivas classes.

## ESTUDO DE CASO

### Fabricação de papel tissue.

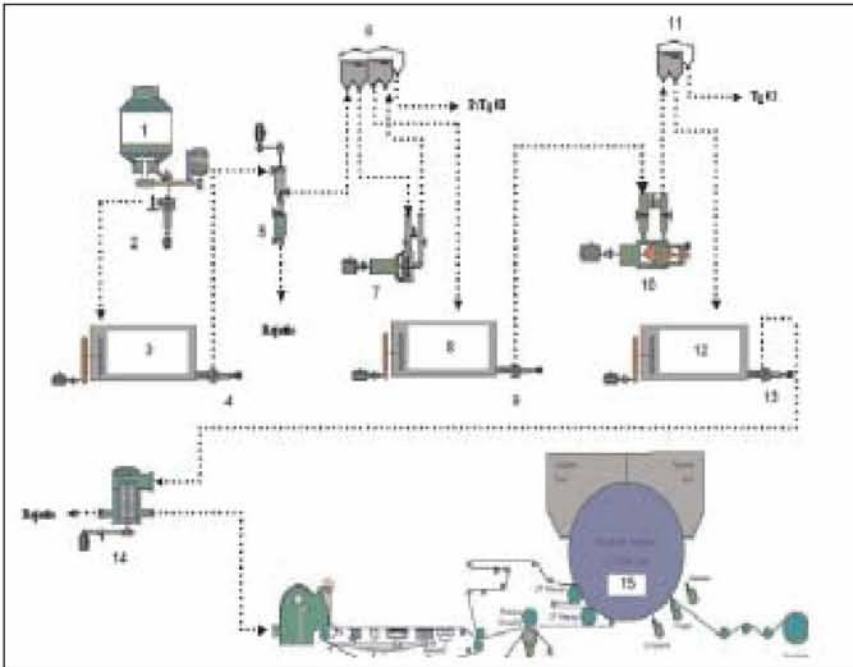


Figura 1 – Fluxograma de Fabricação de Papel Tissue

Tabela 2 - Os quinze equipamentos principais para fabricação de papel Tissue

Equipamento	Nome
1	Pulper ou Desagregador
2	Bomba 01
3	Tanque 01
4	Bomba 02
5	Separador Centrifugo
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

#### Dados para o caso de estudo

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.

#### Equações

O modelo implementado no software comercial de otimização, GAMS foi extraído de GUIARDELLO (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. A função objetivo pode ser descrita como:

$$\begin{aligned} \min & 2 C^{per} (x + y) + \sum_{i=1}^{N_{cp}} c_i^S \\ & + \sum_{k=1}^{N_{pi}} C_k^P [l_k^{x+} + l_k^{x-} + l_k^{y+} + l_k^{y-} + l_k^{z+} + l_k^{z-}] \\ & x, y, z, C_i^S \\ & l_k^{x+}, l_k^{x-}, l_k^{y+}, l_k^{y-}, l_k^{z+}, l_k^{z-} \\ & x_i, y_i, z_i, x_p^n, y_p^n, z_p^n \end{aligned} \quad (1)$$

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

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

Onde:

- $2 C^{per} (x + y)$  se refere ao custo de perímetro da planta que considera uma transformação do custo por área em custo por perímetro (aproximação);

- $\sum_{i=1}^{N_{cp}} c_i^S$  se refere ao custo de su-

porte de cada equipamento, é considerado em função de sua área (fixa) e de sua altura, que pode variar;

- $\sum_{k=1}^{N_{pi}} C_k^P [l_k^{x+} + l_k^{x-} + l_k^{y+} + l_k^{y-} + l_k^{z+} + l_k^{z-}]$

se refere ao custo de tubulações que considera somente a distância entre as posições dos bocais, sem considerar se estão atravessando os componentes ou outros tubos; esse custo garante que os componentes fiquem próximos um dos

outros, mas não fornece o custo real da tubulação, que precisa ser determinada em uma etapa posterior.

### 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 outros), para os diferentes problemas, sem que se altere a formulação do modelo.

### RESULTADOS

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 equipa-

mentos são consideradas "difíceis", pois aparecem de uma forma nas restrições que resulta 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 encontrasse a melhor solução nessas condições. Em função disso, três estudos de caso foram selecionados.

Então a solução encontrada e que foi imposta ao modelo foi que o tanque de diluição ficasse necessariamente abaixo da máquina de papel, visto que é neste

**Tabela 3 - Orientações dos componentes em X para a posição relativa entre os componentes i e j**

Pares i,j para $W_{ij}^x = 1$									
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 4 - Orientações dos componentes em Y para a posição relativa entre os componentes i e j**

Pares i,j para $W_{ij}^y = 1$									
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 5 - Orientações dos componentes em Z para a posição relativa entre os componentes i e j**

Pares i,j para $W_{ij}^z = 1$									
1,2	3,4	5,7	5,15	6,5	6,15	8,9	10,12	11,10	15,12

**Tabela 6 – Número de equações e variáveis**

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

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.

A tabela 6 apresenta o número de variáveis discretas para o caso em estudo, sendo que 120 delas foram fixadas iguais a 1 como restrições do problema conforme tabelas 3, 4 e 5, onde são apresentados os pares de componentes ij para os quais uma das variáveis nas posições relativas foi fixada. Fixando a variável discreta  $W_{ij}^x = 1$  implica que, obrigatoriamente,  $x_i > x_j$ . Da mesma forma  $W_{ji}^x =$

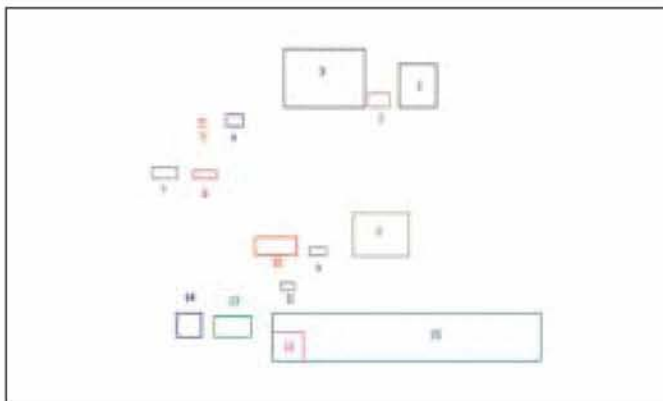
**Tabela 7 - Resultados obtidos para custo**

Custo	
<b>best bound e depth first</b>	
Terreno	26.100,00
Suporte	2.343,01
Tubulação	12.855,93
Z Ótimo	41.928,95

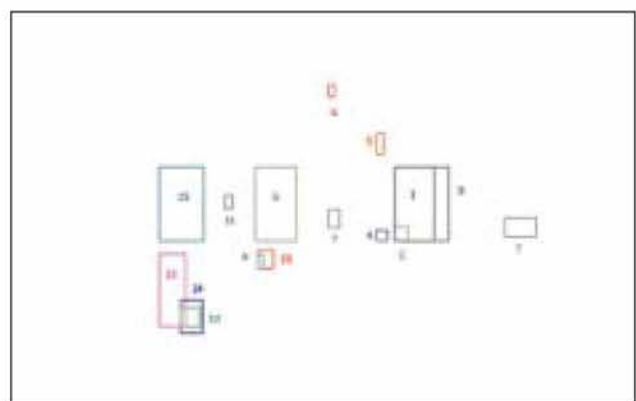
**Tabela 8 - Tempo computacional**

best bound e depth first	
Tempo	1 s
Nº Iterações	244
Nós	0

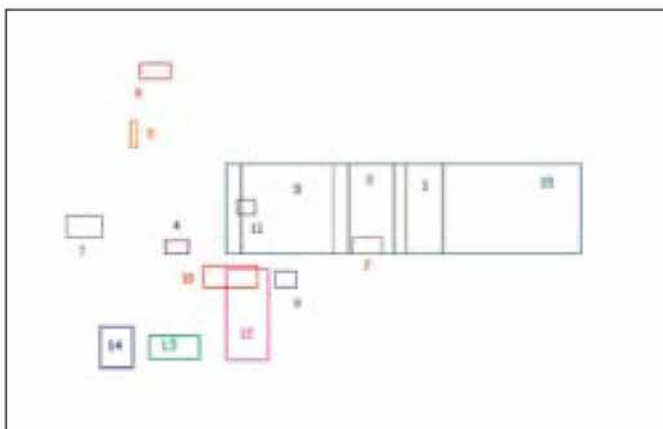
1 implica  $x_j > x_i$ ; para  $W_{ij}^y = 1$  implica que  $y_i > y_j$ ; para  $W_{ji}^y = 1$  implica  $y_j > y_i$ ; para  $W_{ij}^z = 1$  implica  $z_i > z_j$ ; para  $W_{ji}^z = 1$   $z_j > z_i$ . As tabelas 3, 4, 5 apresentam as posições relativas fixadas. Dessa forma, apenas as variáveis discretas de rotação foram determinadas pela otimização nesse estudo de caso.



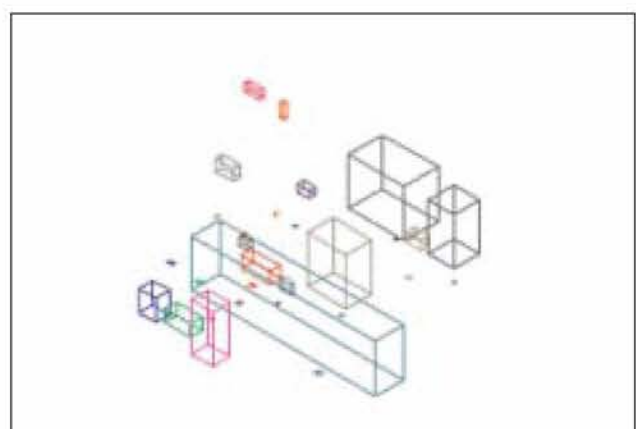
**Figura 2: Vista Superior**



**Figura 3: Vista Lateral**



**Figura 4: Vista Frontal**



**Figura 5: Vista Isométrica SE**

A tabela 7 apresenta os valores encontrados para o custo, sendo que o valor ótimo da função objetivo foi de US\$ 41.928,95.

A tabela 8 apresenta os valores do tempo computacional obtido nas estratégias best bound e depth first.

As opções que estão sendo testadas dentro do solver CPLEX 7.5 referem-se a escolha dos algoritmos "depth first" e "best bound", que são estratégias de pesquisa do algoritmo Branch & Bound.

Após a obtenção dos dados fornecidos pelo GAMS, utilizou-se o software Autocad 2004 para obtenção da localização dos equipamentos da planta Tissue. As figuras 2,3,4 e 5 mostram as vistas dos equipamentos.

## 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 próximos ao do melhor layout utilizado como resultado neste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico (CNPq) e à Contech Produtos Biodegradáveis Ltda., cuja parceria e apoio possibilitaram a realização deste trabalho.

## BIBLIOGRAFIA

BAZARAA, M.S., Computerized layout design: A branch and bound approach, *AIIE Transactions*. Vol. 7, Nº 4, 432-437, 1975.

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., & ELSHAFEI, A.N., An exact branch and bound procedure for quadratic assignment problems. *Naval Research Logistics Quarterly*. Vol. 26, 109-121, 1979.

BURKARD, R.E., Locations with spatial interaction - Quadratic assignment problem, in: R.L. Francis and P.B. Mirchandani (eds.) *Discrete Locations Theory*, Academic Press, New York, 1984.

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.

BROOKE, A., KENDRICK, D. and MEERAUS, A. *GAMS: a user's guide*. San Francisco: The Scientific Press, 1988.

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 Logistics Quarterly*. Vol.25, 129-144, 1978.

BROOKE, A., KENDRICK, D. & MEERAUS, A. *GAMS: a user's guide*. San Francisco: The Scientific Press, 1988.

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.

HERAGU, S. S. & KUSIAK, A., Effi-

ent models for the facility layout problem, *European Journal of Operational Research*. 53, 1 - 13, 1991.

HOUNSELL, MARCELO DA SILVA., *Plant Layout*, 1999

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.

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.

KOUVELIS, P., CHIANG, W. C. & YU, G., Optimal algorithms for row layout problems In automated manufacturing systems, *IIE Transactions*. Vol. 27, 99 - 04, 1995.

LAND, A. H., A problem of assignment with interrelated costs, *Operations Research Quarterly*. Vol. 14, 185-198, 1963.

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, L.M.F., FERNANDES, F.A.N., *Introdução à Modelagem de Sistemas de Polimerização*, 1ª ed, 2002. 116 p.

PALEKAR, U. S., BATA, R., BOSCH, R. M. & ELHENCE, S., Modeling uncertainties In plant layout problems, *European Journal of Operational Research*. Vol. 63, 347 - 359, 1992.

PARKER, R.G.; RARDIN, R.L. "Discrete Optimization" - *Computer Science and Scientific Computing*, Academic Press, Inc., 1998.

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 ed. Prentice Hall, New Jersey, (1998).



# Equipment positioning optimization in tissue paper manufacturing

**Authors:** Daniela M.Devienne Drummond<sup>1</sup>  
Reginaldo Guirardello<sup>2</sup>

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

## ABSTRACT

The main action area of an industrial layout is undoubtedly the company, defining and integrating the productive elements. The question is related to the place and arrangement of departments, cells or machines in a plant or office floor. Because of geometric and combinatory aspects of the problem, the solution of this question may reach high levels of complexity, according to the addition of system variables. Besides, the industrial layout encompasses quantitative and qualitative factors, which when associated may become difficult to model and to analyze. The tissue paper category comprises the toilet papers, which answer for 80% of the production, the towels (16%) and napkins/handkerchiefs (4%), besides the so-called "institutional line" for serving big consumers, such as fast food networks, hospitals, offices, industries etc. Brazil contributes with 3.1% of the world

production and is the 8th country in the worldwide tissue paper production ranking. The purpose of this work is to use the mathematical modeling for optimizing the components in a paper manufacturing plant positioning. The model to be used will be in MILP (Mixed Integer Linear Programming) and the modeling software will be GAMS (General Algebraic Modeling System), which is designed to construct and to solve large and complex mathematical programming models.

## INTRODUCTION

### Paper History

The paper history is intimately connected with reprographics. From the whole of the paper produced all over the world, 90% is printed. And it was as a reprographic support that paper appeared. From the beginnings of Humanity, man has been drawing the visual remembrances of his life. This goes back to 30 thousand years. Those drawings on the cave walls were called pictographies. Later on they

became more complex, appearing the ideographs, the Persian wedge-characters and finally the Egyptian hieroglyphs, around 2500 BC.

As it can be concluded, the development of human intelligence was accompanied by the graphic representations, which became more and more complex, thus coming to represent ideas. History records the use of several types of supports, such as clay tablets, vegetal fiber fabrics, papyruses, parchments and finally the paper.

The most ancient papyrus specimens go back to 3500 BC and their preparation techniques have no trustworthy description up to now. The papyruses were prepared from strips extracted from a plant abundant on the Nile. Those strips were positioned at right angles, wetted, hammered and glued. In spite of the fact that the word paper is derived from papyrus, they are fully different products. In 170 BC, an improved method for obtaining parchment allowed it to be used for writing. Its denomination is derived from the name of the reign of Pergamus.

### Authors' references:

- 1 - Faculty of Chemical Engineering - Department of Chemical Processes - Campinas University, E-mail: dmdd@feq.unicamp.br,
- 2 - Faculty of Chemical Engineering - Department of Chemical Processes - Campinas University, E-mail: guira@feq.unicamp.br

In 105 BC, the Chinese emperor Chien-ch'u, angry to have to write on silk and bamboo, orders his eunuch Ts'ai Lun to invent a new writing material. Ts'ai Lun produces a substance made of fibers of mulberry tree bark, remainders of clothes and hemp, moistening and beating the mixture until forming a paste. Thereafter, using a sieve and drying in the sun the thin layer deposited therein, he obtained a sheet of paper. The basic principle of this process is the same used in paper manufacturing up to now.

The paper manufacturing process remained a secret for over six centuries. However, it was already spread all over China. With the capture of some Chinese craftsmen by the Moors in Samarqand in 751, paper manufacturing reaches Baghdad and Damascus. With the Muslim expansion, paper manufacturing comes over to Europe through the Iberian Peninsula. The first paper mill in Xativa, Spain, goes back to 1094 and the Fabiano mill, in Italy, dates from about 1150. Starting from that time, Europe begins to spread the art of producing paper: France in 1189, Germany in 1291, England in 1330. Curiously, the idea of making paper from wood fibers got lost in some point of the way, as cotton and linen rags became the main raw materials used.

When Gutenberg was born, paper manufacturing was already a well-developed industry all over Europe. The viscous ink, essential for printing, was also being already used in Germany for block printing of titles for handwritten books. The credit for glimpsing the cultural and commercial possibilities of the graphic reproduction process fell to Gutenberg. In the end of the 16th century the Dutch invented the machine that allowed shredding the rags more effectively. The "Hollander engine", as the equipment came to be known, gradually spread, coming to the present days with the same basic

concept, in spite of the numerous improvements received. The first paper mill in the USA was built in Pennsylvania in 1690.

In 1719 the Frenchman Réaumur suggested to use wood, since the intense competition of the textile industry caused the main raw materials used at that time - cotton and linen - to become scarce and expensive. In default of a feasible bleaching method, white paper could be only obtained from white rags. As the demand caused by the Industrial Revolution was growing because of written controls and accounting, the productive capacity gradually reduced. In the end of the 18th century, as chlorine was discovered, the whole of the raw materials increased. The deteriorating effect exerted by the new agents on the material motivated systematic studies of the bleaching process, leading to the creation of methods and conditions minimizing such effect.

In 1798 the Frenchman Nicolas L. Robert designed a machine to replace hand manufacturing by immersion and to produce a continuous roll from a large endless wire screen rotated by hand in order to filtrate the stock. Unable to get a financing in France, Robert sold the patent to the brothers Fourdrinier in England, who continued to develop the equipment until building the paper machine in 1807. The project met with failure because the raw material was expensive and scarce.

While on the one hand the continuous raw material scarcity stimulated innovation, the increasing demand claimed for more effective processes. In 1850, the German Keller, having read about Réaumur's work, developed the machine for grinding wood and transforming it into fibers.

In parallel with the development of the paper industry, the graphic arts, packaging, exercise books and other applications made paper indispensable for the accelerated progress

experienced at that time. The first illustration in books was printed by Albrecht Pfister in 1460, by wood engraving. The books printed between 1570 and 1770 employed the illustration in copper, instead of wood, which resulted in loss of quality.

For over 400 years after their invention, the types were mounted by hand. In spite of the numerous attempts to replace the manual process, only in 1886, as the linotype was invented by Ottmar Mergenthaler, its commercial use became possible. The lithography, discovered by Alois Semefelder in Munich around 1798, also furthered the artistic printing and consequently the paper consumption. It was based on the principle of the present offset process.

The water incompatibility with grease was caused by the deposition of a fatty matter on the areas to be printed on a porous stone. The spare area was moistened with a mixture of gum arabic and water. This process, very popular in the middle of the 19th century, was gradually improved, until Rubel discovered the offset process in 1906. Although accidentally discovered, this process caused a genuine revolution in the graphic arts. It can be stated that from the offset breakthrough the graphic reproduction was no longer an art, becoming an industry.

From the beginning of the 20th century the paper production experienced a vigorous multiplication. Accompanying the second Industrial Revolution, the Mass Production Era, the small producers gave place to large mills, in view of the scale economy.

At that time paper was already cheap and its mass production was constant. Another great boom in paper consumption resulted from the xerography, invented by Chester Carlson in 1938. In 1960, as Xerox 914 was launched, the graphic reproduction was very simplified. Qualified people, special papers, chemical reagents etc. could be dispensed with.

The beginning of the third Industrial Revolution, the Information Era, is ascribed to xerography. The speed at which Information began to circulate had a major influence on the success of many companies. The productivity gains in the offices were expressive.

There are still appreciable technological advances, particularly in electronics, computers, telecommunications etc., and xerography comes to complete them admirably. Paper had and still has a significant participation in contemporaneous culture, to such an extent that in his book *The 100: A Ranking of Influential People in History*, Michael Hart ranks Ts'ai Lun as the seventh most important man of Humanity, ahead of Gutenberg (the eighth) (source: *Papel Champion*, 2003).

The purpose of this work is to use the mathematical modeling to optimize the components in a paper manufacturing plant positioning by means of the equation developed by GUIARDELLO (1993), by making use of commercial package GAMS/CPLEX 7.5.

### **Layout definition and purposes**

According to HOUNSELL (1999), the main action area of an industrial layout is undoubtedly the company, defining and integrating the productive elements. The question is related to the place and arrangement of departments, cells or machines in a plant or office floor. Because of geometric and combinatory aspects of the problem, the solution of this question may reach high levels of complexity, according to the addition of system variables. Besides, the industrial layout encompasses quantitative and qualitative factors, which when associated may become difficult to model and to analyze.

In general it is always preferable to do some process and analysis simplification, decomposing the problem into smaller and separate

problems. This reduces the size and the complexity of the problem, allowing a more complete study of several alternative plans. It can be understood that the layout (plant layout - physical arrangement) is a systematic study that searches for an optimum combination of the industrial facilities concurring to the production within an available space.

Layout is the way in which people, machines and equipment are arranged in a mill. The layout problem is the most economical relative location of the various production areas in the company. In other words, it is the best utilization of the available space resulting in a more effective processing through the shortest distance in the shortest possible time. The planning of a physical arrangement is recommendable for any company, either large or small. With a good physical arrangement, amazing results are obtained in operating cost reduction and in the productivity increase. When implanting a new mill this planning is indispensable.

In those already erected, a change in production processes, manufacturing of new products, the need for cost reduction, the enlargement of a section etc. require an arrangement modification.

The space limitation, time availability and lack of qualified personnel may make it more difficult to implant an optimum layout. However, the optimum layout serves as a directive for any modification to be made. Then an adaptation layout is put into action.

The layout study can be carried out in:

- factories in general;
- offices;
- shops;
- supermarkets, drugstores etc;
- banks;
- farms and other agricultural and cattle raising activities;
- residential buildings and many other activities involving material, labor or machine movement.

### **Papers for sanitary purposes (Tissue)**

This category encompasses the toilet papers, which answer for 80% of the production, the towels (16%) and the napkins/handkerchiefs (4%), besides the so-called "institutional line" for serving bigger consumers, such as fast food networks, hospitals, offices, industries etc. Brazil contributes with 2.8% of the world production, a participation that is being kept since 1990. Besides, the country is the 9th worldwide producer of sanitary paper. The five largest producing companies - Kimberly Clark, Santher, Melhoramentos, Manikraft and Mili - concentrate 54% of the total volume produced, and a movement of acquisitions, associations and modernizations has been observed, involving an increase in capacity, as well as market share changes.

It is believed that the concentration movement will proceed in view of a similar movement on the retail market, where the big supermarket networks demand the negotiation of higher and higher volumes. In 2002 the production of this paper grew by 8.4% for a demand increase of 9.2%. From 1993 on, the average yearly rates of consumption and production growth were 6.4% and 4.7% respectively, with expressive expansions in 1995 and 1996, influenced by the income increase of the population. The internal demand has been met by the expansion corresponding to the production.

### **Present Panorama**

Brazil is the 11th worldwide paper producer and consumer, participating with approximately 2.4% of the worldwide paper production and export, which mainly corresponds to the writing and printing, packaging and board paper surplus amounts. The paper consumption in the '90's in Brazil showed an average growth rate of about 5% p.a., rather higher than the world

**Table 1 - Evolution of production and destination**

Evolution of paper production and destination				
	2003		2004	
Distribution	Accumulated	May	Accumulated	May
Production	1.922.018	656.431	1.989.144	684.993
Own Consumption	373.190	127.130	396.380	145.788
Domestic sales	1.148.093	404.100	1.119.376	398.557
External Sales	345.468	128.626	439.523	159.089

Source: Magazine "O Papel" N° 6/June 2004

average of 3.2% p.a. However, the internal demand in the last years showed below these average indices and even irregular and declining, a situation that showed similar to the worldwide one.

With regard to fibers, Brazil evolved during the last ten years from the 10th to the 8th position among the greatest worldwide virgin fiber consumers, with 2.5% of the overall volume consumed. The country is the 7th worldwide pulp producer, contributing with 4% of the world production, and also the third pulp and market paste manufacturer and the greatest worldwide eucalyptus pulp producer. In the international trade, besides reaffirming as the main eucalyptus pulp exporter, Brazil is an important uncoated writing and printing and packaging paper supplier. As far as Brazilian imports are concerned, newsprint and coated writing and printing papers have a prominent role.

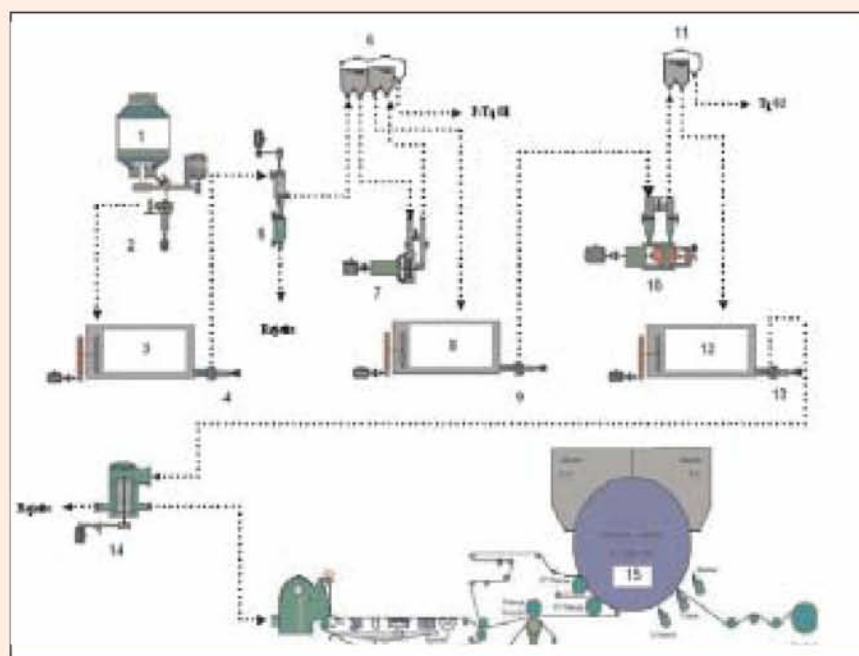
Brazilian pulp and paper exports in 2003 amounted to approximately US\$ 2.8 billions, representing 3.9% of the country's trade balance. This value was 38% higher than that of the previous year, reflecting the improvement in the international prices and an increase in the exported volumes of 33% for pulp and 22% for paper. As to imports, the exchange expenditure amounted to US\$ 561 millions in 2003 versus US\$ 593 millions in the previous year. The international pulp trade has a dimension of 34 million tons, with the eucalyptus fiber participating with 6 million tons, Brazil contributing with 55% of this

total. The international yearly paper trade turnover amounts to about 100

million tons, writing and printing, packaging, newsprint and board papers being the main grades commercialized, with contributions of 40%, 23%, 17% and 13% of the overall turnover, respectively. Brazil exports especially writing and printing, packaging and board papers, which represent 1.6%, 2.2% and 0.8%, respectively, of the world trade of the respective grades.

**CASE STUDY**

Tissue paper manufacturing



**Figure 1 - Tissue Paper Manufacturing Flow Sheet**

**Table 2 - The fifteen main tissue paper manufacturing devices**

Device	Name
1	Pulper
2	Pump 01
3	Tank 01
4	Pump 02
5	Centrifugal Cleaner
6	Level Box 01
7	Deflaker
8	Tank 02
9	Pump 03
10	Refiner
11	Level Box 02
12	Dilution Tank
13	Fan Pump
14	Pressure Screen
15	Paper Machine

### Data for the case study

The flow sheet used for the case study referred to the stock circuit, since this one is common to any paper mill. The water circuit flow sheet has not been included in this work, as it is different, depending on the water recovery requirements for each mill.

### Equations

The model implemented in the commercial optimization software, GAMS, was extracted from GUIRARDELLO (1993) and consists of a plant total cost minimization objective function (Eq.1), as far as component positioning in the layout is concerned, as well as of a series of restrictions, aiming especially at safety and easy access to the plant. The objective function is described as:

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

where:

- $2 C^{per} (x + y)$  refers to the plant perimeter cost which considers a transformation of the cost per area into cost per perimeter (approximation);

- $\sum_{i=1}^{N_{cp}} C_i^s$  refers to the support cost

of each equipment; it is considered as a function of its (fixed) area and of its height, which may vary;

- $\sum_{k=1}^{N_{pi}} C_k^p [l_k^{x+} + l_k^{x-} + l_k^{y+} + l_k^{y-} + l_k^{z+} + l_k^{z-}]$

refers to the piping cost, which only considers the distance between the nozzle positions, without considering whether they are crossing the components or other pipes, this cost guarantees that the components are close to each other, but does not supply the actual piping cost, which must be determined in a later step.

### GAMS Software

The GAMS Software (General Algebraic Modelling System) is designed for the construction and solution of big and complex mathematical programming models, offers powerful resources for programmers, is more understandable for users of models of other disciplines and can make declarations of algebraic models in a concise way, in a language that is easily read as well by modellers as by computers. Thus, the GAMS Software can substantially improve the modeller productivity and expand the extension and usefulness of programming mathematical applications for analyzing action plans and decision-making - SOLETTI & CARVALHO (1999).

The purpose of developing GAMS resulted from frustrated experiences of a group of economic modellers of the World Bank. The programmers of this group wrote their programs in FORTRAN to prepare each model for the solution, the work was hard and mistakes were easy to make and difficult to find. The model programmer was the only person who knew exactly how it worked. Besides, if a programmer gave up, it took months for his successor to master the model.

The Models were difficult and expensive to be changed, especially if the change had not been foreseen and planned. In seminar presentations the modellers had to stand up for the existing versions of their models almost irrationally, because time and money required for making the proposed modifications were prohibitive. Thus, GAMS was designed to change this situation, producing a system of programming structure and language in which concise expressions, generalizations and portability are easily maintained and the computer is also used to trace programming mistakes and details. The computational package GAMS, besides being able to solve all kinds of mathematical programming problems,

is easy to use and allows the user to choose different methods, without needing to alter the structure of the model. Another advantage to be considered is the software/ user interface, which makes use of a programming structure very similar to the way in which the equations are usually written. In addition, the package allows using different resolution methods programmed in the most different commercial packages available (MINOS, CONOPT, OSL, XA, ZOOM, among other), for the different problems, without altering the model formulation.

### RESULTS

The layout optimization model in the MILP form presents continuous variables and integral variables. Among the integral variables the binary variables associated with possible rotations ( $W_{ik}$ ) are considered to be "easy", as they appear in restrictions supplying good lower bound estimations in the Branch and Bound algorithm, while the binary variables associated with the non-overlap and minimum distance between pairs of devices are considered to be "difficult", as they appear in such a way in the restrictions, that they result in bad lower bound estimations, which leads the algorithm to an excessive time to close the gap between upper bound (best integral solution) and lower bound (best relaxation).

Initially some tests have been carried out in which the model was solved in its original form, allowing the algorithm to find the best solution. It was remarked that this led to excessive, several days long CPU times, without reducing significantly the "gap" (less than 30%).

Then it was attempted to fix some of the binary variables of relative position ( $w_{ij}^x, w_{ij}^y, w_{ij}^z$ ) to check whether this would improve the result. Finally it was decided to fix all binary variables of relative

position ( $W_{ij}^x, W_{ij}^y, W_{ij}^z$ ), but all binary variables of rotation ( $W_{ik}$ ) and all continuous variables were left free, to allow the algorithm to find the best solution under these conditions. As a function of this, three case studies were selected.

Then the solution found and imposed upon the model was that the dilution tank should remain necessarily below the paper machine, since it is in this tank that the stock dilution is carried out, for later inlet into the headbox and subsequent paper web formation on the Fourdrinier. No obligatory restriction was imposed on the remaining equipment, just the sequence required for the stock flow was indicated, leaving up to GAMS to make the best equipment location choice.

Table 6 shows the number of discrete variables for the case in study, 120 of which having been fixed equal to 1 as problem restrictions according to tables 3, 4 and 5, where the pairs of components ij are presented, for which one of the variables in the relative positions was fixed. Fixing the discrete variable  $W_{ij}^x = 1$  implies that obligatorily  $x_i > x_j$ . In the same way  $W_{ji}^x = 1$  implies  $x_j > x_i$ ; for  $W_{ij}^y = 1$  it implies  $y_i > y_j$ ; for  $W_{ji}^y = 1$  it implies  $y_j > y_i$ ; for  $W_{ij}^z = 1$  it implies  $z_i > z_j$ ; for  $W_{ji}^z = 1$  it implies  $z_j > z_i$ . Tables 3, 4 and 5 show the relative positions fixed. Thus, only the discrete rotation variables were determined by the optimization in this case study.

Table 7 shows the values found for the cost, the optimum value of the objective function having been US\$ 41,928.95.

Table 08 shows the computational time values obtained at the best bound and depth first strategies.

The options that are being tested inside the CPLEX 7.5 solver refer to the choice of depth first and best bound algorithms, which are research strategies of Branch & Bound algorithm.

After obtaining the data supplied by GAMS, software Autocad 2004 was

**Table 3 - Orientations of the components in X for the relative position between components i and j**

Pairs i,j for $W^{ij} = 1$									
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

**Table 04 - Orientations of the components in Y for the relative position between components i and j**

Pairs i,j for $W^{ij} = 1$									
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					

**Table 5 - Orientations of the components in Z for the relative position between components i and j**

Pairs i,j for $W^{ij} = 1$									
1,2	3,4	5,7	5,15	6,5	6,15	8,9	10,12	11,10	15,12

**Table 6 - Number of equations and variables**

Block of Equations	27
Block of Variables	24
Non-zero elements	9,312
Simple Equations	1,680
Simple Variables	1,642
Discrete Variables	645

**Table 7 - Results obtained for cost**

Cost	
best bound e depth first	
Ground	26,100.00
Support	2,343.01
Piping	12,855.93
Optimum Z	41,928.95

**Table 8 - Computational time best bound and depth first**

Time	1 s
Nº of Iterations	244
Knots	0

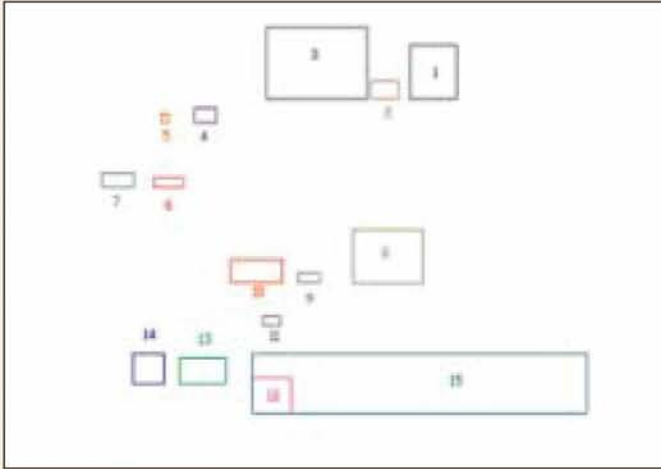


Figure 2: Top View

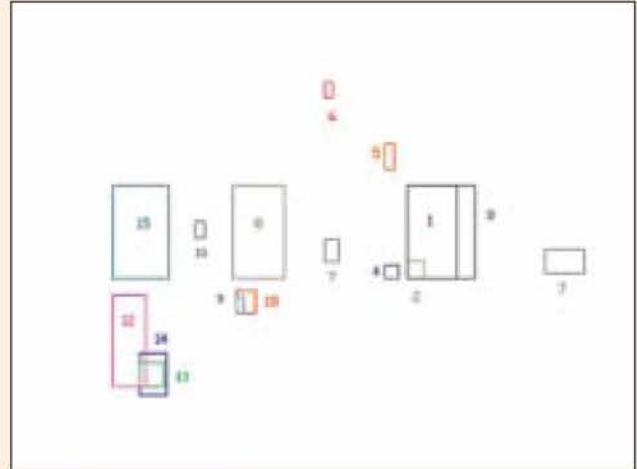


Figure 3: Side View

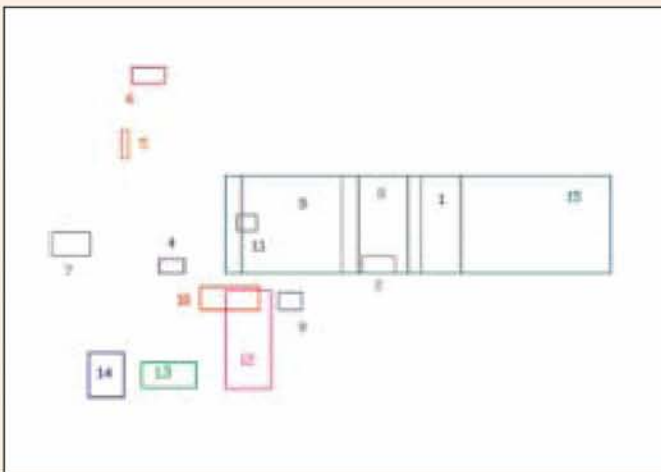


Figure 4: Front View

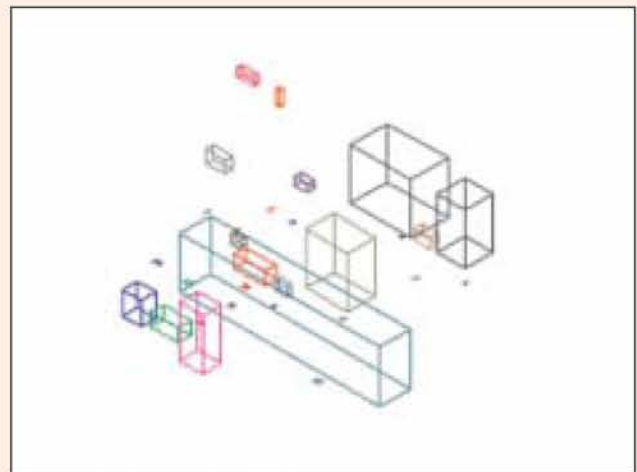


Figure 5: Isometric SE View

used to obtain the tissue plant equipment location. Figures 2, 3, 4 and 5 show the equipment sights.

## CONCLUSION

The following topics can be observed in this work:

- That the algorithm used to solve the problem was very efficient;
- The computational time was very good, in spite of the great amount of position variables that have been necessarily fixed, due to the great amount of equipment in the tissue manufacturing plant;
- It was remarked that the less the amount of variables of positions that have been fixed, the worse was the computational time, even with optimum Z values near that of the best layout used as result in this work.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank the National Council of Technological Development (CNPq) and Contech Produtos Biodegradáveis Ltda. for their partnership and support, which made possible to carry out this work.

## LITERATURE

- BAZARAA, M.S., Computerized layout design: A branch and bound approach, *AIIE Transactions*. Vol. 7, Nº 4, 432-437, 1975.
- 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., & ELSHAFEI, A .N., An exact branch and bound

procedure for quadratic assignment problems. *Naval Research Logistics Quarterly*. Vol. 26, 109-121, 1979.

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.

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, Nº1, 29-41, 1980.

BROOKE, A., KENDRICK, D. and MEERAUS, A. *GAMS: a user's guide*. San Francisco: The Scientific Press, 1988.

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.

BROOKE, A., KENDRICK, D. & MEERAUS, A. GAMS: a user's guide. San Francisco: The Scientific Press, 1988.

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.

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

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.

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.

KOUVELIS, P., CHIANG, W. C. & YU, G., Optimal algorithms for row layout problems In automated manufacturing systems, IIE Transactions. Vol. 27, 99 - 04, 1995.

LAND, A .H., A problem of assignment with interrelated costs, Operations Research Quarterly. Vol. 14, 185-198, 1963.

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, L.M.F., FERNANDES, F.A.N., Introdução à Modelagem de Sistemas de Polimerização, 1ª ed, 2002. 116 p.

PALEKAR, U. S., BATA, R., BOSCH, R. M. & ELHENCE, S., Modeling uncertainties In plant layout problems, European Journal of Operational Research. Vol. 63, 347 - 359, 1992.

PARKER, R.G.; RARDIN, R.L. "Discrete Optimization" - Computer Science and Scientific Computing, Academic Press, Inc., 1998.

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 ed. Prentice Hall, New Jersey, (1998). ▲

**pce**  
PAPEL, CAIXAS E  
EMBALAGENS S/A



- Embalagens Resistentes
- Excelente Custo x Benefício
- Embalagens Customizáveis
- Ecologicamente Responsável

Você cria o produto  
Nós criamos a embalagem

Av. Grande Circular, 1000 - Armando Mendes  
Fone: (92) 2123-8800 - Manaus - Amazonas