

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



Otimização de Layout de Plantas Químicas Utilizando o Problema de Designação Quadrática

Autora: Sheila Souza de Almeida

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Guirardello

Dissertação de mestrado apresentada à
faculdade de Engenharia Química – UNICAMP –
como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Química.

Campinas – SP

Dezembro de 2008

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

Al64o Almeida, Sheila Souza de
Otimização de layout de plantas químicas utilizando o problema de esignação quadrática / Sheila Souza de Almeida. --Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientador: Reginando Guirardello.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Layout. 2. Modelos matematicos . 3. Otimização combinatoria. 4. Programação (Matemática). I. Guirardello, Reginaldo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Título em Inglês: Layout optimization In chemical plants using the problem of quadratic assignment

Palavras-chave em Inglês: Layout, Mathematical models, Combinatorial optimization, Programming (Mathematics)

Área de concentração: Departamento de Processos Químicos

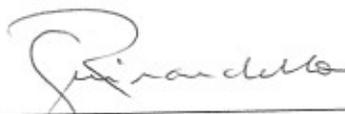
Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora: André Gonçalves Antunha, Maria Regina Wolf Maciel

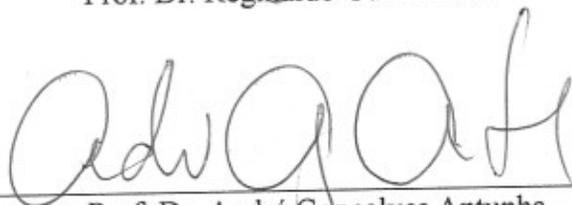
Data da defesa: 18/12/2008

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

Dissertação de Mestrado defendida por Sheila Souza de Almeida e aprovada em 18 de dezembro de 2008 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof. Dr. Reginaldo Guirardello



Prof. Dr. André Gonçalves Antunha



Profa. Dra. Maria Regina Wolf Maciel

2009 05 22 22

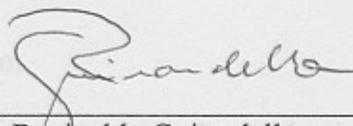
Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química defendida por Sheila Souza de Almeida e aprovada pela comissão julgadora em 18/12/2008

A Deus, pela plenitude da vida; pela maravilha do mundo;

Ao professor, orientador Reginaldo Guirardello, pela atenção e confiança depositada; serei eternamente grata pela oportunidade;

Aos meus colegas de departamento que de alguma forma contribuíram para o andamento deste trabalho;

A CAPES, pelo apoio financeiro



E a todos que direta ou indiretamente influenciaram alguma forma nesta fase da minha vida.

Meus sinceros agradecimentos.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família que proporcionou a oportunidade de eu hoje estar aqui finalizando mais uma etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela plenitude da vida; pela maravilha do mundo;

Ao professor, orientador Reginaldo Guirardello, pela atenção e confiança depositada; serei eternamente grata pela oportunidade;

Aos meus colegas de departamento que de alguma forma contribuíram para o andamento deste trabalho;

A CAPES, pelo apoio financeiro;

E a todos que direta ou indiretamente me ajudaram de alguma forma nesta fase da minha vida.

Meus sinceros agradecimentos.

*A vida é um problema de otimização: um erro nem sempre traz o pior...
...mas sim as escolhas que fazemos depois do erro!*

(Autores)

*Carlos Eduardo de Andrade
Flávio Lúcio Nogueira Batista
Rodrigo Franco Toso*

RESUMO

O *Layout* de uma indústria é de grande preocupação no seu desenvolvimento e, por este motivo, engenheiros e pesquisadores vêm cada vez mais se aprofundando no assunto. A escolha de um bom *Layout* tem influência nos custos, na segurança, operação e manutenção que são fatores de grande importância para o projeto de planta industrial.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento da metodologia através de um modelo matemático de otimização para a definição de um *Layout* industrial através da minimização da função custo, tendo como restrições os critérios de espaço para a segurança, operação e manutenção da planta.

Será utilizado como modelo de otimização o problema de atribuição quadrático (QAP), onde se aloca os elementos em uma malha de posições predeterminadas, minimizando a função objetivo.

Como este modelo tem uma grande dificuldade em encontrar soluções exatas em tempo viável para a otimização de problemas com grande número de elementos, será utilizado como alternativa métodos heurísticos, que são métodos que encontram soluções rápidas em tempo curto, encontrando uma aproximação para a solução ótima, de fácil implementação e pouco espaço de memória.

Dentre as técnicas heurísticas encontra-se o algoritmo *Simulated Annealing*, um método no qual a solução ótima pode não ser obtida, mas soluções muito próximas a ela são geradas em um tempo de execução muito menor que outras técnicas. Uma característica típica do algoritmo de *Simulated Annealing* é que além de aceitar soluções que representam melhoramentos no custo, também aceita “deteriorações” (soluções com custo maior) com um certo limite.

O mecanismo de geração de soluções escolhido neste trabalho foi a troca de posições entre pares de elementos.

A planta escolhida para este estudo foi a de produção de poliéster com 50 equipamentos. Foi necessário estimar com precisão o tamanho e a geometria da rede, para que o tempo computacional fosse o melhor para cada caso.

Os resultados indicam que o método escolhido mostrou-se adequado e os *Layouts* obtidos foram satisfatórios.

ABSTRACT

The layout of an industry is of great concern to its development, and for this particular reason, engineers and researchers are increasingly diving deeper into the subject. Choosing a good layout has a direct influence on costs, security, operations and maintenance, which are all factors of large importance for the project of an industrial plant.

This study aims at the development of the methodology through a mathematical optimization model for the definition of an industrial layout by minimizing the cost function, with the restrictions of space criteria for safety, operation and maintenance of the plant.

The quadratic assignment problem (QAP), which allocates the elements on to a mesh of preset positions thus minimizing the objective function, will be used as an optimization model.

Layout problems usually have great difficulty to encounter exact solutions in viable time for the optimization of problems containing a large numbers of elements; therefore, the alternative heuristic method will be used. This method encounters rapid solutions in short timeframes, finding an approximation for an optimal solution, easy to implement and requires a small amount of storage space.

Among the heuristic techniques is the Simulated Annealing algorithm, a method in which an optimal solution may not be obtained, however solutions very close to it are generated in an execution time much smaller than other techniques. A typical characteristic of the Simulated Annealing algorithm is that in addition to accepting solutions that represent improvements in cost, it also accepts deterioration (solutions with greater costs) within a certain limit. The mechanism of generation of new solutions chosen in this study was to change positions between the pairs of elements.

In order to demonstrate the proposed approach, a polyester production plant with 50 pieces of equipment was chosen. It was necessary to estimate with precision the size and geometry of the network, so that the computational time was the best for each case. The results indicate that the chosen method proved to be appropriate and the layouts obtained were satisfactory.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	01
1.1	Objetivo e Justificativa do trabalho	02
1.2	Estrutura da Dissertação	02
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
2.1	Informação técnica sobre layout de plantas químicas	04
2.1.1	Problemas de Arranjo Físico – Facility Layout	04
2.1.2	Elaboração de Layout de Processos	08
2.1.3	Tipos de Layout	09
2.1.4	Layout Industrial de Plantas Químicas	13
2.2	Modelos matemáticos para layout de plantas químicas	14
2.3	Conclusão	16
3	ABORDAGEM PROPOSTA	17
3.1	O Problema de Atribuição Quadrático	17
3.2	Abordagem Proposta	18
4	DEFINIÇÃO DAS MATRIZES	21
4.1	Matriz de Distância $[d_{kl}^{(1)}]$	22
4.2.	Matriz de Custo $[c_{ij}^{(1)}]$	23
4.3.	Matriz de Distância $[d_{kl}^{(2)}]$	23
4.4.	Matriz de Custo $[c_{ij}^{(2)}]$	24
4.5.	Matriz de Distância $[d_{kl}^{(3)}]$	25

4.6. Matriz de Custo $[c_{ij}^{(3)}]$	25
4.7. Matriz de Distância $[d_{kl}^{(4)}]$	26
4.8. Matriz de Custo $[c_{ij}^{(4)}]$	26
4.9. Matriz de Distância $[d_{kl}^{(5)}]$	27
4.10. Matriz de Custo $[c_{ij}^{(5)}]$	27
4.11. Matriz de Custo $[b_{ik}]$	28
4.12. Considerações Finais sobre as Matrizes	29
5 MÉTODOS E ALGORITMOS DE RESOLUÇÃO	30
5.1. Tamanho do Problema	30
5.2. Método Heurístico	31
5.3. Algoritmo de <i>Simulated Annealing</i>	32
5.4. Cálculo da Função Objetivo	37
5.5. Implementação do Algoritmo	39
6 ESTUDO DE CASO	40
6.1 Descrição do Processo	40
6.2 Obtenção das matrizes	44
6.2.1. Distância entre os pontos da malha de posições possíveis	45
6.2.2. Distância mínima entre equipamentos	45
6.2.3. Custos unitários de tubulação	46
6.2.4. Custos unitários de bombeamento	47
6.2.5. Custos de posicionamento	48
6.2.6. Restrições do processo	49

7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
	7.1. Descrição da Implementação dos Testes	51
	7.2. Malhas Testadas – Resultados	51
	7.3. Estudo de Desempenho do Algoritmo de AS	58
	7.4. Análise dos Resultados	60
8	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS	63
	ANEXO 1 Descrição dos equipamentos e dos custos unitários de tubulação e Bombeamento.	75
	ANEXO 2 Gráficos e Tabelas para o Cálculo dos Custos Unitários da tubulação (GUTHRIE, 1974).	93
	ANEXO 3 Gráfico para o Cálculo dos Custos de Suportes de Aço (GUTHRIE, 1974).	96
	ANEXO 4 Programa em FORTRAN	98
	ANEXO 5 Tabelas de posições dos equipamentos das malhas	117
	ANEXO 6 Gráficos de Desempenho do Algoritmo de SA	125
	ANEXO 7 Artigo Publicado	140

NOMENCLATURA

→

\vec{A} : Vetor área

A : Área do suporte

a_{ijkl} : Parâmetro do problema de designação quadrático

$b_{ik}^{(1)}$: Custo de instalação e suporte do componente i na posição k

b_{ik} : Custos que dependem somente da posição de cada componente na planta

C : Custo unitário de tubulação em 1970 (US\$/ft)

C_b : Custo base para um determinado diâmetro de tubulação

c_{ij} : Custo por unidade de comprimento de tubulação do componente i para o componente j

F : Fatores de ajuste

F_s : Fator de instalação

C_0 : Custo original em US\$ (março de 1970)

C_I : Custo atualizado em US\$ (março de 2004)

C_s : Custo do suporte

C_V : Custo por unidade de volume da estrutura do suporte

c_k : Seqüência finita dos valores do parâmetro de controle;

c_0 : Valor inicial do parâmetro de controle

$c_i^{(1)}$: Custo unitário da tubulação entre o componente i e a entrada da alimentação

$c_i^{(2)}$: Custo unitário de tubulação entre o componente i e a saída dos produtos

$c_i^{(3)}$: Custo de bombeamento vertical entre a entrada e o componente i

$c_i^{(4)}$: Custo de bombeamento vertical entre o componente i e a saída (fixada)

$[c_{ij}^{(1)}]$: Custo unitário de tubulação entre equipamentos (i,j)

$[c_{ij}^{(2)}]$: Custo unitário de bombeamento entre equipamentos (i,j)

$[c_{ij}^{(3)}]$: Custo de penalidade entre equipamentos (i,j) associada a matriz DAEC(k,l)

$[c_{ij}^{(4)}]$: Custo de penalidade entre equipamento (i,j) associada a matriz DSSP(k,l)

$[c_{ij}^{(5)}]$: Custo de penalidade entre equipamento (i,j) associada a matriz DSFP(k,l)

cp_{ij} : Custo de bombeamento entre os components i e j

$d_{ka}^{(1)}$: Distância de Manhattan entre a posição k e a posição da entrada (fixada)

$d_{ks}^{(1)}$: Distância de Manhattan entre a posição k e a posição da saída (fixada)

$d_{ka}^{(2)}$: Distância vertical entre a posição de entrada (fixada) e a posição k

$d_{ks}^{(2)}$: Distância vertical entre a posição a posição k e a saída (fixada)

D : Diâmetro do tubo (m);

e : Energia total do sistema

E_i : Energia interna do sólido i

g : Aceleração gravitacional

H : Altura (m)

H_{LT} : Perda de carga na tubulação (m^2/s^2).

I_0 : Índice passado (março de 1970)

I_1 : Índice atualizado (março de 2004)

k_B : Constante de Boltzmann.

L : Comprimento do tubo (m)

L_k : Comprimento finito para cada cadeia de Markov

M : Valor penalty

\dot{m} : Vazão mássica (kg/s)

m_1 : Número de transições que apresentam um custo menor que a disposição anterior

m_2 : Número de transições que apresentam um custo maior que a disposição anterior

m_3 : Número de transições que apresentam um custo maior que a disposição anterior, mas são aceitas com certa probabilidade

N : Número de posições

N_c : Número de elementos

P : Pressão (N/m²)

Q : Taxa de transferência de calor (J/s)

T : Temperatura do banho de calor (K)

t : Tempo

V : Vetor de velocidade

V : Velocidade de escoamento (m/s)

\dot{W}_{eixo} : Trabalho de eixo

$\dot{W}_{cisalhamento}$: Trabalho de cisalhamento

\dot{W} : Trabalho de bombeamento

W_m : Média dos valores do incremento Δz após as transições

W : Energia de bombeamento (W)

Z : Valor da função custo

ρ : Densidade do fluido

u : Energia interna específica

f : Fator de atrito

δ : Parâmetro de distância

χ : Razão de aceitação (número de transições aceitas/número de transições propostas)

χ_0 : Razão de aceitação inicial (número de transições aceitas/número de transições propostas)

σ : Desvio padrão das distribuições

i : Índice referente a um elemento i

j : Índice referente a um elemento j

k : Índice referente a uma posição k

l : Índice referente a uma posição l

LISTA DE FIGURAS

6.1	Fluxograma do processo de produção de Poliéster. (GUNN E AL-ASADI, 1987).	41
7.1	Variação do custo médio (Z) em função do parâmetro de controle (c_k).	58
7.2	Variação da razão de aceitação (λ) em função do parâmetro de controle (c_k).	59
7.3	Variação da derivada relativa de Z médio (DR) em função de c_k .	59
7.4	Variação do desvio padrão médio (σ) em função de c_k .	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1	Identificação e quantidades de equipamentos.	42
Tabela 7.1	Melhores valores encontrados para malhas diferentes ($\delta = 0,30$ e $M=100000$)	53
Tabela 7.2	Melhores valores encontrados para diferentes δ (malha $5 \times 5 \times 5$ e $M=100000$)	53
Tabela 7.3	Melhores valores encontrados para diferentes M (malha $5 \times 5 \times 5$ e $\delta = 0,30$)	54
Tabela 7.4	Posições dos equipamentos - caso da malha $5 \times 5 \times 5$ ($\delta = 0,05$ e $M = 100000$)	55

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A finalidade de um layout industrial é encontrar o arranjo espacial de equipamentos mais econômico, respeitando requisitos de segurança, localização, manutenção e acesso, dentre outras restrições. Para se obter um bom *layout*, é de grande importância a combinação de critérios qualitativos e quantitativos. Os critérios qualitativos estão baseados na prática, experiência e intuição do profissional e os critérios quantitativos estão baseados em modelos matemáticos.

Neste contexto, aplicações industriais e diversas metodologias envolvendo o problema de layout de forma geral têm sido abordadas na literatura, cujo objeto de estudo é otimizar a localização relativa de departamentos ou equipamentos em um ou mais pavimentos. Entre as muitas abordagens usadas para o problema de *Layout Industrial*, um modelo matemático de grande importância é o problema de atribuição quadrático (QAP). Em geral, a maior dificuldade do problema é encontrar uma solução ótima em um tempo viável para problemas com um grande número de elementos. Uma boa alternativa para a resolução do QAP baseia-se na aplicação de um algoritmo heurístico. Para o presente trabalho, utilizou-se o Simulated Annealing, sendo este vantajoso devido à sua capacidade de encontrar uma resposta boa em um tempo aceitável.

O principal interesse deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para se encontrar em um tempo aceitável um bom layout de uma planta química de tamanho razoável (~50 equipamentos). Os ambientes computacionais propostos neste trabalho atuam fundamentalmente com o objetivo de minimizar os custos, assegurando a proximidade dos equipamentos, ao mesmo tempo em que são respeitadas as restrições de distâncias mínimas

de segurança. Os programas desenvolvidos neste trabalho para as simulações utilizaram a linguagem FORTRAN em conjunto com o Autocad para a melhor visualização do layout obtido pelas simulações.

1.1 Objetivo e Justificativa do trabalho

O objetivo principal do trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia que permita encontrar em um tempo computacional aceitável um bom layout de uma planta química com um número razoavelmente grande de equipamentos.

Os métodos existentes são capazes de fornecer um bom layout ou mesmo a solução ótima, mas em geral para um número pequeno de equipamentos ou em um tempo proibitivamente longo. Dessa forma, é de interesse prático a disponibilidade de uma ferramenta computacional adequada para esse tipo de problema.

Devido ao volume expressivo de dados que são usualmente envolvidos na definição do layout de uma planta química, são utilizadas ferramentas gráficas para visualização do layout final obtido. Entretanto, a avaliação final do mesmo depende do custo total envolvido, satisfazendo todas as restrições exigidas para um bom layout.

1.2 Estrutura da Dissertação

No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica, onde é feito um estudo sobre arranjo físico e as definições mais comuns de layout, em particular os problemas conceituais envolvidos em layout de processos químicos, e os modelos de otimização de plantas químicas disponíveis na literatura.

No Capítulo 3, mostra-se o modelo na forma de problema de atribuição quadrática, que foi escolhido para esse trabalho, destacando-se a vantagem dessa abordagem para problemas com número elevado de equipamentos.

No Capítulo 4, apresenta-se a definição das matrizes para a modelagem do problema, uma vez que essa etapa é fundamental na caracterização do problema.

No Capítulo 5, apresenta-se uma descrição dos métodos numéricos mais usados em otimização e uma descrição do método de Simulated Annealing, que foi escolhido para o presente trabalho.

No Capítulo 6, apresenta-se o estudo de caso considerado, com aproximadamente 50 equipamentos, com o fluxograma e todos os dados utilizados para a otimização do layout da planta.

No Capítulo 7, apresentam-se os resultados e a análise dos mesmos e, finalmente, no Capítulo 8, apresentam-se a conclusão e as sugestões para outros trabalhos.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Informação Técnica sobre Layout de Plantas Químicas

Neste item, faz-se uma revisão da informação técnica necessária para a elaboração do layout de um processo químico, incluindo a revisão de problemas de arranjo físico de máquinas e departamentos (*Facility Layout*), a definição geral de layout, os diversos tipos de layout existentes e, especificamente, o layout de plantas químicas, objeto de estudo desse trabalho.

2.1.1. Problemas de Arranjo Físico – *Facility Layout*

A utilização do espaço físico passou a ser importante nos últimos tempos e, com isso, o cenário econômico mundial tem motivado cada vez mais as empresas a buscarem melhor qualidade e redução dos custos.

Planejar o arranjo físico significa tomar decisões sobre a forma como as máquinas ou equipamentos serão dispostos na instalação ou planta industrial, onde devem permanecer os centros dos trabalhos. Esses centros de trabalhos podem, conceitualmente, ser qualquer coisa que ocupe o espaço, como por exemplo: um departamento, uma sala, uma máquina, um equipamento, uma bancada ou mesmo uma pessoa. Para isso, as atividades devem ser desenvolvidas de uma forma racional, evitando o desperdício de tempo (transporte, de um local para o outro, de itens ou materiais), facilitando a movimentação. Ao arranjo físico dentro de um ambiente dá-se o nome de *Layout*.

O problema de arranjo físico se caracteriza como um problema de otimização combinatória. A otimização combinatória é um ramo da ciência da computação que estuda problemas de otimização.

A aplicação de metodologias eficazes de projeto e otimização para a resolução do problema de *layout* é de vital importância para a melhoria da disposição de equipamentos e funcionários em uma empresa. Neste contexto, aplicações industriais e diversas metodologias para problemas de layout têm sido abordadas nas literaturas KUSIAK & HERAGU (1987), MELLER & GAU (1996). Entre os trabalhos pioneiros, destacam-se KOOPMANS & BECKMAN (1957), ARMOUR & BUFFA (1963), NUGENT et. al. (1968) e VOLLMAN & BUFFA (1966), cujo foco principal era otimizar a localização relativa de departamentos (*facility layout*) em um único pavimento, formulando o problema do layout de fábrica como um problema de atribuição quadrática (do inglês, *quadratic assignment problem* – QAP) (MARTINS et al., 2003).

Dois objetivos têm sido considerados para otimizar os arranjos físicos. Um deles é quantitativo e outro qualitativo. Na prática, são usados um de cada vez, na avaliação do arranjo físico. Por exemplo, um objetivo quantitativo é minimizar o manuseio de material, e um objetivo qualitativo é o de minimizar algumas medidas de avaliação da proximidade de departamentos (SAVSAR, 1991).

Segundo EVANS et al. (1987), os problemas de projeto de arranjo físico podem ser separados em duas categorias básicas. A primeira usa modelos quadráticos de atribuição como formulação básica e a segunda é caracterizada pelo uso do gráfico de relacionamento no projeto do processo. Neste mesmo trabalho, EVANS et al. citam que o termo *facilities layout* (arranjo físico) vem sendo empregado com frequência no campo industrial. O problema de arranjo físico envolve o posicionamento de um número de itens da instalação, tais como departamentos ou máquinas, onde o custo para movimentar o material necessário entre instalações é minimizado (HERAGU e KUSIAKI, 1991).

Para TAM e LI (1991), as instalações são, usualmente, modeladas como um bloco com certa forma. As três formas mais comuns são: retangular, quadrada e circular. Dentre as formas citadas, a forma mais comum é a retangular, da qual a quadrada é um caso particular. Forma circular, apesar de poder ser representada facilmente através das

coordenadas da posição do centro e do raio do círculo, e ser citada por alguns autores como sendo de mais fácil manuseio computacional, não representa a realidade para o caso de máquinas e departamentos (mas pode representar certos equipamentos industriais).

A dificuldade de resolver o problema de arranjo físico se origina do fato de que a localização de cada instalação depende da localização de outras. A complexidade aumenta ainda mais, quando se impõem restrições de forma e de tamanho (TAM, 1992b).

Dependendo do sistema de movimentação a ser utilizado, podem-se obter configurações diferentes para o arranjo físico da planta (layout). Apesar de todos os esforços de pesquisa, a maioria das ferramentas computacionais desenvolvidas foca em um determinado conjunto de algoritmo ou método, fornecendo suporte a um número restrito de atividades do projeto de arranjo físico. Isso limita o trabalho dos projetistas, forçando-os a utilizar várias ferramentas computacionais ou manuais para desenvolver todas as atividades necessárias. Nesse processo, surgem diversas dificuldades com relação à preparação dos dados, escolha do algoritmo com a função objetivo mais apropriada para cada caso, interpretação dos resultados, dentre outras dificuldades apresentadas por HASSAN (2000).

Outros autores utilizam ferramentas computacionais diferentes, tais como inteligência artificial. Observam-se na literatura diversos outros métodos que estão sendo utilizados na solução do problema de arranjo físico.

ABDOU e DUTTA (1990) apresentaram um sistema especialista em EXSYS que utiliza uma base de dados para obter arranjo físico de máquina sobre combinações específicas de manufatura e sistemas de mão de obra. A base de dados incorpora seis fatores, relacionando a variedade e quantidade de produtos, grau de flexibilidade, nível de automação, sistema de mão de obra, peças em acabamento e considerações gerais.

SIRINAOVAKUL e THAJCHAUAPONG (1994) apresentaram um modelo construtivo, baseado em técnicas da Inteligência Artificial. O sistema consiste de alocação de padrões, um método de busca heurística e um sistema de base de dados.

BADIRU e ARIF (1996) mostraram um sistema FLEXPERT que considera na solução a natureza multi-critério do problema de arranjo físico e as variações dos dados de

entrada pela integração de um sistema especialista e um algoritmo baseado na teoria da lógica difusa.

WELGAMA e GIBSON (1996) apresentaram um modelo para solução de arranjo físico e sistemas de mão de obra dinâmicos, integrando abordagens metodológicas de base de dados e otimização.

EVANS et al. (1987) apresentaram uma heurística utilizando a teoria de conjuntos difusos na solução do problema de arranjo físico de departamentos. Esta heurística utiliza descrição aproximada para duas categorias distintas do desenho: proximidade e importância expressas na forma de relações difusas para cada par de departamentos.

ROSENBLATT e LEE (1987) apresentaram métodos de robustez usados na solução de problemas de arranjo físico com demandas estocásticas para períodos simples.

GOLANY e ROSENBLATT (1989) apresentaram um algoritmo heurístico para resolver o problema quadrático de atribuição. O algoritmo tem três fases distintas: construtiva, atribuição e melhoramento.

MALAKOOTI (1989) apresentou um algoritmo heurístico, na solução do problema de arranjo físico de instalações multi-objetivos, que gera eficientes arranjos físicos a partir de trocas de pares de departamentos.

HERAGU e KUSIAK (1990) apresentaram dois modelos para resolver o problema de arranjo físico de máquinas em sistemas manufatureiros automatizados. Destes modelos derivam um sistema baseado em conhecimento para a solução do problema de arranjo físico de máquinas. Neste sistema, são combinados os conceitos de otimização e sistemas especialistas considerando fatores tanto quantitativos quanto qualitativos.

SAVSAR (1991) apresentou um método sistemático e um algoritmo de simulação para resolver o problema de arranjo físico flexível de instalações. Critérios tais como minimizar o custo total de mão de obra, maximizar a razão total de proximidade entre departamentos, minimizar os custos futuros com mudanças e minimizar o custo total de mão de obra esperado em possíveis mudanças futuras são incorporados no modelo.

KAKU et al. (1991) apresentaram um procedimento heurístico combinando um método construtivo com um procedimento de trocas usado repetidamente.

TAM (1992a) apresentou um algoritmo utilizando a técnica de *simulated annealing* e compara com dois métodos de busca local.

HASSAN (1994) apresentou um estudo do problema de arranjo físico de máquinas em modernas instalações manufatureiras e sugere áreas potenciais de pesquisa.

MALMBORG (1994) apresentou um método analítico para o problema de arranjo físico com previsão de estoques de peças em processamento, resultante de um número fixo de *loop*, alimentado por veículos automatizados. O modelo apresentado utiliza dois algoritmos, um de busca de melhoramento local e outro de *Simulated Annealing*.

RAOOT e RAKSHIT (1994) apresentaram uma heurística para solução do problema de arranjo físico de instalação, formulado como um problema quadrático de atribuição com um ou múltiplos objetivos, baseada na teoria do conjunto difuso.

2.1.2. Elaboração de Layout de Processos

Em geral o termo “*design*” de planta inclui aspectos de engenharia no desenvolvimento de novas plantas, ou modificações e expansão de uma planta química já existente. Neste desenvolvimento, a engenharia química produz uma evolução econômica de novos processos de *design* de equipamento para produção de novos empreendimentos, ou desenvolvimento de um layout de planta para coordenação total da operação.

Layout de processos são mais complexos que outros tipos de layout e seu desenvolvimento provavelmente é uma das atividades mais criativas envolvendo a Engenharia Química, mas sendo necessário o conhecimento também da Engenharia Mecânica, bem como considerações de desenho geométrico (KERN, 1978).

Para a elaboração do melhor layout, as informações necessárias podem ser obtidas através do fluxograma de processos dos vasos e de suas conexões por tubos, desenhos dos tanques com elevação entre outras especificações (KERN, 1977). Os layouts podem ser

construídos a partir de dados básicos (algoritmos construtivos) ou melhorados quando já existentes (algoritmos de melhoramentos).

O layout é a disposição física dos equipamentos industriais. Inclui o espaço necessário para movimentação de material, armazenamento, mão-de-obra indireta e todas as outras atividades e serviços dependentes, além do equipamento de operação e o pessoal que o opera a planta.

Os objetivos básicos do layout são:

- Integração total de todos os fatores que afetam o arranjo físico
- Movimentação de materiais por distância mínima
- Trabalho fluído através da fábrica
- Todo o espaço efetivamente utilizado
- Satisfação e segurança para os empregados
- Um arranjo flexível que possa facilmente ser reajustado

2.1.3. Tipos de Layout

Na literatura podem-se encontrar diversos tipos de Layout, cada qual com suas aplicações, vantagens e formas. Muitas variações e combinações dos tipos podem ser feitas, de acordo com as necessidades. São três os tipos básicos de layout: de produto (ou linear), de processo (ou funcional) e posicional (ou fixo) (FRANCIS & WHITE, 1974):

- Layout funcional (ou por processo)
- Layout posicional (ou fixo)
- Layout linear (ou em linha ou por produto)

O **Layout Funcional** ou por processo é o tipo mais encontrado na indústria. A principal característica é agrupar-se todas as operações de um mesmo "tipo" de processo. O Layout funcional pode ser, também, definido como aquele que representa as diversas

seções (ou equipamentos e máquinas) e o fluxo que o processo segue desde a matéria-prima até o produto acabado. Assim, as seções (ou equipamentos e máquinas) figuram como elementos básicos do Layout, enquanto os produtos seguem trajetórias diferentes (CHIAVENATO, 1991).

Para FIORONI & BATOCCHIO (2000), no sistema funcional, os recursos fabris da empresa com a mesma função são agrupados em setores, onde a matéria-prima é transportada em lotes ao longo dos diferentes setores sofrendo operações específicas em cada um destes setores.

FILHO (2001) relata outra característica do layout funcional, a complexidade, em virtude do grande número de alternativas possíveis na sua configuração.

Os objetivos do projeto de um Layout Funcional são:

- Minimizar os custos unitários de produção
- Otimizar a qualidade intrínseca
- Promover o uso efetivo das pessoas, equipamento, espaço e energia
- Proporcionar ao empregado, conveniência, segurança e conforto
- Permitir a gestão dos custos de projeto
- Atingir as metas e prazos finais de produção

Vantagens:

- Melhor utilização das máquinas
- É adaptado a uma variedade de produtos e mudanças na seqüência e operação
- É adaptado à demanda intermitente
- É mais fácil manter a continuidade de produção no caso de quebra de máquina, falta de material, etc.

Usa-se o Layout Funcional quando:

- As máquinas forem de difícil movimentação
- Tiver grande variedade de produtos
- Tiver grandes variações nos tempos requeridos para diferentes operações
- Tiver demanda pequena ou intermitente

No **Layout Linear** ou linha de produção, ou por produto, o material é que se move. Uma operação segue imediatamente adjacente à operação anterior. Os equipamentos são dispostos de acordo com a seqüência de operações.

O Layout Linear ou por produto é o tipo de layout caracterizado por grandes lotes de produção e máquinas para fins específicos. Possui menor variabilidade de produtos e maior mecanização. São contínuos ou interrompidos. Quando contínuos produzem um item complexo em grande quantidade. Quando o volume se torna muito grande, em especial em uma linha de montagem, o layout em linha é chamado de produção em massa. Este sistema pode ter altas taxas de produção (BLACK, 1998).

O Layout em linha também pode ser definido como aquele que representa cada tipo de operação desde a entrada de matéria-prima em uma extremidade até a saída do produto acabado na outra extremidade, indicando a trajetória (etapas de produção) que constituiu a menor distância entre seus dois extremos (CHIAVENATO, 1991).

Vantagens:

- Manuseio reduzido de materiais
- Quantidades reduzidas de material em processo
- Uso mais efetivo da mão-de-obra
- Facilidade de controle
- Melhor uso do espaço

Usa-se Layout Linear quando:

- Tiver grandes quantidades de peças
- O produto for mais ou menos padronizado
- A demanda for estável
- Puder ser mantida a continuidade do fluxo de material - operações balanceadas.

O **Layout Posicional** ou por posição fixa, é usado para montagens complexas. O material ou componentes principais ficam em um lugar fixo.

O Layout Posicional é um tipicamente voltado para o projeto. O produto permanece em uma posição fixa durante a fabricação devido ao seu peso e/ou tamanho. Os recursos, como pessoas, matérias, máquinas são trazidas para o local em que as operações de fabricação serão realizadas. Em outras palavras, os recursos são móveis (BLACK 1998).

Vantagens:

- O transporte de unidades montadas é reduzido
- Não é afetado por mudanças nos produtos
- Não requer estudo muito custoso.

Usa-se Layout Posicional quando:

- As operações de conformação de o material utilizarem apenas ferramentas manuais ou máquinas simples
- Estiverem sendo feitas poucas unidades de certo tipo
- O custo de movimentação for alto.

2.1.4. Layout Industrial de Plantas Químicas

O principal objetivo do layout de processos é encontrar o arranjo espacial mais econômico de todos os vasos de processos e equipamentos e suas conexões por tubos, enquanto são satisfeitos os requerimentos de construção, operação, manutenção e segurança (MECKLENBURGH, 1985). Dessa forma, a escolha do melhor layout é de grande interesse no projeto da planta industrial.

A maior parte dos procedimentos para se projetar um layout de processos vem da experiência prática (ANDERSON, 1982, KERN, 1977 e 1978a, MECKLENBURGH, 1985). O layout completo e final requer conhecimentos das áreas de engenharias química e mecânica e considerações de projeto geométrico (KERN, 1978b).

Por causa dos aspectos geométricos e combinatórios do problema de layout, sua solução pode atingir altos níveis de complexidade, de acordo com o aumento do número de variáveis do problema. 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.

Segundo GUIRARDELLO (1993), o planejamento de um layout de plantas químicas pode ser feito seguindo-se algumas regras práticas:

- divisão da planta em módulos
- uso de padrões retangulares
- uso de “*pipe-racks*”.

Para a divisão da planta em módulos, faz-se uma minimização da distância e do custo de tubulação agrupando os equipamentos em um mesmo módulo. O objetivo é a divisão da planta em diversos módulos (GUIRARDELLO, 1993/4).

O *pipe-rack* concentra a maioria das linhas e dos tubos do processo. Na maioria dos layouts industriais, os equipamentos são arranjados em série ao redor do *pipe-rack* central (KERN, 1977 e ANDERSON, 1982).

Com o aumento da competitividade no mundo, a otimização do layout de plantas químicas requer cada vez mais o uso de ferramentas computacionais eficientes, além de modelos matemáticos capazes de descrever o problema de forma adequada. Estes serão descritos no item a seguir.

2.2. Modelos Matemáticos para Layout de Plantas Químicas

Modelos matemáticos são de grande ajuda para se encontrar o melhor layout, satisfazendo as restrições de segurança e operacionalidade. Apresentam as mais diversas aplicações em diferentes áreas, como, por exemplo, em engenharia química (layout de plantas), em engenharia industrial (facility layout) e em engenharia elétrica (layout de circuito elétrico) (FRACEIRA, 2001).

De forma geral, os modelos matemáticos estão divididos em dois grandes tipos:

- Modelos de simulação que procuram oferecer uma representação real com o objetivo de permitir a geração e análise de alternativas, dando ao analista um considerável grau de flexibilidade com relação à escolha da ação mais conveniente.
- Modelos de otimização, que não permitem flexibilidade na escolha da alternativa, tendo em vista que é estruturado para selecionar uma única alternativa, que será considerada ótima, segundo o critério do analista. Seu critério faz parte da estrutura do modelo que encontra a melhor alternativa através de uma análise matemática.

Um processo industrial pode ser muito complexo (grande número de equipamentos e interconexões) e a otimização do layout da planta tem uma natureza combinatória que torna muito difícil a resolução do problema. A parte mais difícil é a determinação do melhor posicionamento dos componentes (vasos, equipamentos, etc), devido à não-

convexidade da região factível (a posição dos componentes não pode coincidir, ou seja, não podem ocupar a mesma região no espaço). Assim sendo, modelos matemáticos podem ser muito úteis no projeto do layout de um processo químico.

Na literatura podem ser encontrados vários tipos de modelos e abordagens para a otimização de layout de processos químicos. Alguns desses modelos usam domínio contínuo para as variáveis de posição, enquanto outros modelos usam domínio discreto ou uma malha de posições possíveis, considerando-se a maneira como os componentes podem ser posicionados na planta.

Modelos baseados em domínios contínuos consideram posições para os componentes que são representadas por variáveis contínuas, tanto na forma de uma programação mista inteira e linear (ÖZYURT & REALFF, 1999; BARBOSA-PÓVOA et al, 2001, 2002; PATSIATZIS & PAPAGEORGIU, 2002, 2003; WESTERLUND et al, 2005; GUIRARDELLO & SWANEY, 2005), uma programação mista inteira e não-linear (PENTEADO & CIRIC, 1996; PAPAGEORGIU & ROTSTEIN, 1998), ou uma programação não-linear (GUNN AND AL-ASADI, 1987).

Modelos baseados em uma malha de pontos consideram posições em um domínio discreto, onde os componentes podem ser designados ou posicionados (NEWELL, 1973; GEORGIADIS et al, 1999; FRANCEIRA, 2001). O modelo é então resolvido como um “*Assignment Problem*”. Se a função objetivo for linear, tem-se um caso mais simples, que pode ser facilmente resolvido. Se a função objetivo for quadrática, levando em conta as interações entre componentes, tem-se um problema de resolução mais difícil (“*Quadratic Assignment Problem*”), mas de maior interesse prático.

A maioria dos modelos matemáticos propostos para otimização de layout de processos faz uso das mesmas regras práticas que são conhecidas pela experiência dos engenheiros projetistas. Todos os modelos incluem como função objetivo a minimização do custo total de tubos conectando os equipamentos, todos incluem as restrições de não-sobreposição de equipamentos, as restrições de distância mínima de segurança entre equipamentos. Modelos mais completos incluem custos de suportes, de bombeamento, de tamanho ocupado pela planta, dentre outros.

Nos modelos encontrados na literatura, os equipamentos são representados por blocos de diversas formas, mas usualmente são retangulares ou cilíndricos. Entretanto, para o caso de modelos discretos (posições pré-definidas) a forma do equipamento não é crítica, uma vez que os pontos da malha de posições têm uma distância suficiente para que o equipamento seja alocado, independentemente de sua forma.

2.3. Conclusão

Nesta dissertação, um modelo baseado em domínio discreto foi considerado. Para a resolução, o problema de layout de processos foi transformado em um problema quadrático de atribuição ou designação (“*Quadratic Assignment Problem*”). A formulação será discutida no capítulo seguinte.

Capítulo 3

ABORDAGEM PROPOSTA

3.1. O Problema de Atribuição Quadrático

O problema quadrático de atribuição ou de designação (*Quadratic Assignment Problem* - QAP) é colocado na sua forma mais geral da seguinte forma (LOVE et al; 1988, MIRCHANDANI & FRANCIS, 1990):

$$\min Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N a_{ijkl} \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} \quad (3.1)$$

onde:

i e j = elementos

k e l = posições

sujeito a:

$$\sum_{k=1}^N x_{ik} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ik} = 1 \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3.3)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\}$$

onde x_{ik} é igual a 1 se o elemento i é atribuído à posição k e 0 caso contrário.

As diferentes aplicações para o QAP são determinadas através da escolha apropriada dos parâmetros a_{ijkl} . O QAP é uma generalização do problema de atribuição ou designação simples (*Assignment Problem*) dado por:

$$\min Z = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N c_{ik} \cdot x_{ik} \quad (3.4)$$

satisfazendo as mesmas restrições dadas pelas equações (3.2) e (3.3). A principal vantagem do QAP é levar em conta interações entre elementos alocados em posições diferentes. A desvantagem é que é mais difícil de ser resolvido (encontrar a solução ótima) do que o caso linear.

3.2. Abordagem Proposta

Para este trabalho de dissertação, foi escolhido o QAP como modelo matemático para a formulação do problema de otimização do *layout* de processos químicos. O principal motivo foi sua generalidade em permitir incluir os aspectos usuais encontrados em um *layout* de processos químicos, além de sua simplicidade de formulação. Entretanto, simplicidade de formulação não implica em simplicidade de resolução, como será visto no Capítulo 5 onde se apresenta a técnica de resolução escolhida para o QAP.

A estratégia utilizada na formulação do modelo matemático consiste em transferir toda a complexidade do problema de *layout* para a etapa de definição das matrizes de custos e distâncias entre equipamentos, que serão por sua vez incorporadas na definição dos parâmetros a_{ijkl} da equação (3.1), conforme se apresenta no Capítulo 4.

Além disso, o uso do modelo na forma de um problema de atribuição ou designação implica na necessidade de uma definição prévia de uma rede de posições

possíveis onde os componentes podem ou não ser posicionados. A definição desta rede de posições possíveis é uma etapa fundamental do modelo, pois já restringe o número de soluções factíveis.

A rede de posições pode ter qualquer geometria. Entretanto, para este trabalho foi adotada uma malha retangular. O número de posições da rede deve ser maior que o número de equipamentos, de tal forma a permitir maior flexibilidade. Para as posições não ocupadas por equipamentos reais são atribuídos equipamentos fantasmas, sem nenhum custo real associado. Dessa forma, o modelo continua na forma de um QAP como apresentado nas equações (3.1), (3.2) e (3.3), onde N é o número total, de posições disponíveis.

A definição da rede de posições possíveis deve já incluir um espaçamento mínimo entre os equipamentos, de tal forma a evitar a sobreposição de equipamentos e também assegurar uma distância mínima para operação e manutenção dos equipamentos. Uma vez que qualquer equipamento pode ser atribuído a qualquer posição, a geometria dos equipamentos não entra explicitamente na formulação do modelo, o que simplifica a formulação do problema por um lado, e limita sua aplicação por outro lado. Dessa forma, para se incluir equipamentos com geometrias mais complicadas, estes podem ser divididos em dois equipamentos fictícios, que devem, então, ocupar duas posições adjacentes na rede de posições.

As restrições típicas do problema de layout, como as distâncias mínimas de segurança entre pares específicos de equipamentos, são incluídas de forma implícita no modelo por meio da utilização de penalidades na função custo, que são incluídas nos parâmetros a_{ijkl} , conforme é apresentado no Capítulo 4.

Na modelagem do problema de layout, todos os custos associados com o posicionamento de equipamentos são também incluídos nos coeficientes a_{ijkl} , tais como

custos de instalação e suporte de equipamentos, custos de bombeamento, custos das tubulações que ligam os equipamentos às entradas e às saídas da planta ou pipe-racks.

Capítulo 4

DEFINIÇÃO DAS MATRIZES

Conforme descrito no capítulo anterior, a estratégia utilizada consiste em transferir toda a complexidade do problema do layout para a definição dos parâmetros a_{ijkl} , que neste trabalho foram calculados por:

$$a_{ijkl} = b_{ik} \cdot \delta_{ij} + \sum_{m=1}^5 c_{ij}^{(m)} \cdot d_{kl}^{(m)} \quad (4.1)$$

onde

$$\delta_{ij} = 1 \text{ se } i = j, \text{ e } \delta_{ij} = 0 \text{ se } i \neq j.$$

i e j são equipamentos e k e l são as posições.

Existem dois tipos de custos na equação (4.1): (i) custos que dependem somente da posição de cada componente na planta (b_{ik}), tais como custos de instalação, suportes e tubulação conectando o componente com posições fixas na planta (pipe-racks), e (ii) custos que dependem da posição relativa entre pares de componentes ($c_{ij} \cdot d_{kl}$), tais como tubulações entre eles, bombeamento de um componente para outro e custos de penalidade (restrições adicionais de distância de segurança, etc.).

As restrições são incluídas no problema através de matrizes custos de penalidade, de tal forma que o problema de layout com restrições se transforma em um problema de layout sem restrições (além daquelas típicas de um problema de atribuição, ou seja, um componente em cada posição e uma posição para cada componente). Adota-se um valor grande para cada penalidade de tal forma que não haja violação. A vantagem dessa abordagem é que ela não é sensível às disposições iniciais, não há risco de se assumir configurações não-factíveis, apenas muito caras, de tal forma a evitar o travamento do método, o que é muito comum em problemas com muitas restrições.

Para este trabalho, a definição das matrizes segue o mesmo procedimento descrito por Franceira (2001), de tal forma que as matrizes são definidas da forma descrita a seguir.

4.1. Matriz de Distância $[d_{kl}^{(1)}]$

Esta matriz é usada para medir a distância de Manhattan entre dois pontos k e l , sendo seus elementos dados por:

$$d_{kl}^{(1)} = |x_k - x_l| + |y_k - y_l| + |z_k - z_l| \quad (4.2)$$

onde:

x, y, z são as coordenadas espaciais.

Essa matriz é utilizada para estimar a distância da tubulação ligando pares de equipamentos. A motivação para seu uso está no fato de que, em plantas de processos químicos, a tubulação costuma seguir percursos que são paralelos às dimensões maiores da planta em vez de seguir uma diagonal entre os pontos, de forma a liberar espaço para circulação na planta.

A matriz $[d_{kl}^{(1)}]$ é simétrica, ou seja, $d_{kl}^{(1)} = d_{lk}^{(1)}$. Ela fornece apenas uma aproximação do comprimento real da tubulação, uma vez que a distância dada pela equação (4.2) não leva em consideração possíveis obstáculos no caminho, além de pequenas curvas para evitar efeitos de stress mecânico devido à dilatação térmica.

Essa matriz é utilizada no cálculo dos custos de tubulação e também no cálculo de parte dos custos de bombeamento que dependem do comprimento total da tubulação.

4.2. Matriz de Custo $[c_{ij}^{(1)}]$

Esta matriz é utilizada para os custos de tubulação entre pares de componentes, sendo seus elementos dados por:

$$c_{ij}^{(1)} = \begin{cases} 0,5 \cdot c_{ij} & \text{se os componentes } i \text{ e } j \text{ estão conectados} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.3)$$

onde c_{ij} é o custo por unidade de comprimento de tubulação do componente i para o componente j . Pode também incluir custos de bombeamento que são proporcionais ao comprimento total do tubo, como o de atrito. O fator 0.5 é usado para compensar o fato do valor dessa matriz ser incluído duas vezes na equação (4.1), pois $c_{ij}^{(1)}$ multiplica $d_{kl}^{(1)}$ e as duas matrizes são simétricas, o que faz com que esse valor seja somado duas vezes no cálculo da função objetivo.

4.3. Matriz de Distância $[d_{kl}^{(2)}]$

Essa matriz é usada para medir a distância vertical de uma posição k para uma posição l , caso o ponto k esteja abaixo do ponto l , sendo essa distância dada por:

$$d_{kl}^{(2)} = \begin{cases} z_l - z_k & \text{se } z_k \leq z_l \\ 0 & \text{se } z_k > z_l \end{cases} \quad (4.4)$$

a matriz $[d_{kl}^{(2)}]$ não é simétrica, ou seja, $d_{kl}^{(2)} \neq d_{lk}^{(2)}$. Ela é usada para calcular a parte dos custos de bombeamento que dependem da distância vertical. Além disso, leva em conta a diferença de bombear um fluido de baixo para cima de simplesmente escoar por gravidade um fluido de cima para baixo.

4.4. Matriz de Custo $[c_{ij}^{(2)}]$

Essa matriz é usada para os custos bombeamento, sendo seus elementos dados por:

$$c_{ij}^{(2)} = \begin{cases} cp_{ij} & \text{se o fluxo é do componente } i \text{ para o componente } j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.5)$$

onde cp_{ij} é o custo de bombeamento entre os components i e j que são proporcionais à altura (distância vertical, não o comprimento total do tubo). Uma vez que a direção do fluxo é importante na equação (4.5), $cp_{ji} = 0$ se $cp_{ij} \neq 0$ (observar os índices em direções opostas). A matriz $[c_{ij}^{(2)}]$ é multiplicada pela matriz $[d_{kl}^{(2)}]$ e elas são ambas simétricas. Como resultado, o custo de bombeamento proporcional à altura é adequadamente incluído na função objetivo. Por exemplo, considere que o componente i está localizado na posição k e o componente j está localizado na posição l , com fluxo de material de i para j . Se a posição k está abaixo da posição l , o custo de bombeamento é incluído; se a posição k está acima da posição l , esse custo não é incluído, uma vez que pode fluir por gravidade. Além disso, uma vez que o fluxo não é do componente j para o componente i , na equação (4.1) esse custo não é inadequadamente incluído quando os índices são trocados na somatória.

4.5. Matriz de Distância $[d_{kl}^{(3)}]$

Os elementos desta matriz são definidos por:

$$d_{kl}^{(3)} = \begin{cases} 1 & \text{if } z_k \leq z_l \\ 0 & \text{if } z_k > z_l \end{cases} \quad (4.6)$$

Essa matriz assimétrica é usada para verificação de penalidade se algum componente não pode ser designado para uma posição k abaixo de outro componente em uma posição l (ou se um componente não pode ser designado para uma posição l acima de outro componente em uma posição k). Essa matriz é usada para restrições de posicionamento relativo, como, por exemplo, bombas que necessitem ficar abaixo de um certo equipamento, ou algum equipamento que deva fazer escoamento por gravidade para algum outro equipamento específico.

4.6. Matriz de Custo $[c_{ij}^{(3)}]$

Os elementos dessa matriz são definidos por:

$$c_{ij}^{(3)} = \begin{cases} M & \text{se o componente } i \text{ deve estar acima do componente } j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.7)$$

Essa matriz multiplica a matriz $[d_{kl}^{(3)}]$, o que resulta em uma penalidade M na função objetivo se o componente i for designado para uma posição abaixo da posição do componente j , onde M é um número grande (bem maior que qualquer custo real na planta, para não compensar tal designação). Essas duas matrizes são assimétricas, de tal forma que essa penalidade é adequadamente incluída. Esse tipo de penalidade é usado para restringir componentes que se requer fisicamente que sejam designados para posições relativas acima ou abaixo de outros componentes.

4.7. Matriz de Distância $[d_{kl}^{(4)}]$

Os elementos dessa matriz são definidos por:

$$d_{kl}^{(4)} = \begin{cases} 1 & \text{if } |x_k - x_l| + |y_k - y_l| + |z_k - z_l| \leq p \cdot d \\ 0 & \text{if } |x_k - x_l| + |y_k - y_l| + |z_k - z_l| > p \cdot d \end{cases} \quad (4.8)$$

Essa matriz é usada para restrições de distância de segurança que sejam maiores que o espaçamento entre pontos vizinhos na rede de posições definida previamente. Para esse trabalho, foi considerado apenas o caso $p=1$, o que implica em distâncias maiores do que uma distância unitária entre posições adjacentes da malha. Entretanto, se necessário, é possível definir mais de uma matriz deste tipo para o mesmo problema, com valores diferentes de p e diferentes matrizes para pares que tenham restrições (uma vez que pares específicos podem ter distâncias de segurança diferentes). Para algumas situações, o critério de distância dado por $\max\{|x_k - x_l|, |y_k - y_l|, |z_k - z_l|\}$ pode ser mais apropriado.

4.8. Matriz de Custo $[c_{ij}^{(4)}]$

Os elementos dessa matriz são definidos por:

$$c_{ij}^{(4)} = \begin{cases} M & \text{se os componentes } i \text{ e } j \text{ devem estar afastados} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.9)$$

Essa matriz multiplica a matriz $[d_{kl}^{(4)}]$, o que resulta em uma penalidade no valor da função objetivo se os componentes i e j são designados para posições com distância menores ou iguais a $p \cdot d$. As duas matrizes são simétricas, de tal forma que a penalidade resultante na função objetivo será de $2 \cdot M$.

4.9. Matriz de Distância $[d_{kl}^{(5)}]$

Os elementos dessa matriz são definidos por:

$$d_{kl}^{(5)} = \begin{cases} 1 & \text{se } |x_k - x_l| + |y_k - y_l| + |z_k - z_l| \neq d \\ 0 & \text{se } |x_k - x_l| + |y_k - y_l| + |z_k - z_l| = d \end{cases} \quad (4.10)$$

Essa matriz simétrica é utilizada para componentes longos, que requerem duas posições na rede de posições previamente definida. O componente fisicamente real é dividido em dois componentes fictícios que devem obrigatoriamente ser designados para posições adjacentes, de tal forma que uma penalidade é atribuída se a distância entre esses pseudo-componentes não é igual à distância entre posições adjacentes na malha. Eventualmente também pode ser usada para o caso de dois componentes reais que necessitem serem designados próximos um ao outro.

4.10. Matriz de Custo $[c_{ij}^{(5)}]$

Os elementos dessa matriz são definidos por:

$$c_{ij}^{(5)} = \begin{cases} M & \text{se os componentes } i \text{ e } j \text{ devem estar próximos} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.11)$$

Essa matriz multiplica a matriz $[d_{kl}^{(5)}]$, o que resulta em uma penalidade na função objetivo se os componentes i e j não estão em posições adjacentes na malha. As duas matrizes são simétricas, de tal forma que a penalidade resultante na função objetivo tem um valor igual a $2 \cdot M$ para o caso dos componentes especificados não ocuparem posições adjacentes.

4.11. Matriz de Custo $[b_{ik}]$

Essa matriz de custo inclui todos os custos que estão relacionados apenas com a designação de um componente i para uma posição k , independentemente da posição relativa de outros componentes, tais como custos de instalação, custos de suportes, custos de tubulação de ou para o pipe-rack (considerando uma posição fixada para os pontos de entrada e saída do pipe-rack), e custos de bombeamento entre o componente e o pipe-rack (considerado como posição previamente fixada).

Dessa forma, os elementos da matriz $[b_{ik}]$ podem ser calculados por:

$$b_{ik} = b_{ik}^{(1)} + c_i^{(1)} \cdot d_{ka}^{(1)} + c_i^{(2)} \cdot d_{ks}^{(1)} + c_i^{(3)} \cdot d_{ka}^{(2)} + c_i^{(4)} \cdot d_{ks}^{(2)} \quad (4.12)$$

onde:

$b_{ik}^{(1)}$ é o custo de instalação e suporte do componente i na posição k ,

$c_i^{(1)}$ é o custo unitário da tubulação entre o componente i e a entrada da alimentação,

$d_{ka}^{(1)}$ é a distância de Manhattan entre a posição k e a posição da entrada (fixada),

$c_i^{(2)}$ é o custo unitário de tubulação entre o componente i e a saída dos produtos,

$d_{ks}^{(1)}$ é a distância de Manhattan entre a posição k e a posição da saída (fixada),

$c_i^{(3)}$ é o custo de bombeamento vertical entre a entrada e o componente i ,

$d_{ka}^{(2)}$ é a distância vertical entre a posição de entrada (fixada) e a posição k ,

$c_i^{(4)}$ é o custo de bombeamento vertical entre o componente i e a saída (fixada),

$d_{ks}^{(2)}$ é a distância vertical entre a posição a posição k e a saída (fixada).

4.12. Considerações Finais sobre as Matrizes

É importante ressaltar que todo o detalhamento do *layout* da planta química está embutido na definição das matrizes apresentadas anteriormente. Dessa forma, seu cálculo é uma etapa fundamental do projeto do layout, onde todos os dados de custos e distâncias de segurança são incluídos, além de detalhes como pares de componentes específicos que necessitem estar próximos ou afastados um do outro.

Capítulo 5

MÉTODOS E ALGORITMOS DE RESOLUÇÃO

Neste capítulo, é apresentada uma descrição do método de *Simulated Annealing* que foi utilizado para a resolução do QAP para otimização do layout de processos químicos, bem como uma justificativa para a escolha desse método.

5.1. Tamanho do Problema

O problema de otimização de *layout* de processos químicos, formulado como um QAP conforme descrito no Capítulo 3, pode ter um tamanho considerável do ponto de vista do número de combinações possíveis. Por exemplo, para uma rede cúbica tridimensional com 10 posições em cada eixo, o número de posições possíveis é 1000. Considerando uma planta com apenas 20 equipamentos (componentes) para serem posicionados na planta, com as 1000 posições possíveis para cada um deles, o número de permutações ordenadas é de $(1000!)/(980!)$, que é, aproximadamente, igual a 8.3×10^{59} . Obviamente, uma inspeção de cada combinação é inviável do ponto de vista computacional. Transformando-se o problema em uma programação matemática, onde se definem as variáveis binárias x_{ik} , para o caso onde componentes “fantasmas” são considerados (de tal forma que o número de componentes a serem posicionados é igual ao número de posições disponíveis), o número de variáveis binárias x_{ik} é igual a 1000000, o que também não é prático, mesmo com os recursos computacionais modernos de *hardware* e *software*.

O QAP é uma generalização do problema do caixeiro viajante e dessa forma faz parte da classe de problemas NP-completo (SAHNI & GONZÁLES, 1976). Problemas NP-

completos (*nondeterministic polynomial problems*) são em geral de difícil solução, pois não há algoritmo capaz de encontrar a solução ótima de um problema de grandes proporções em tempo polinomial, sendo geralmente em tempo exponencial (GAREY & JOHNSON, 1979).

Dessa forma, métodos exatos para QAP são utilizados apenas para problemas com pequeno número de elementos. Para problemas maiores, os algoritmos preferidos para a resolução do QAP são algoritmos heurísticos, que, embora não garantam a solução ótima possível, com frequência encontram soluções muito boas próximas à solução ótima.

5.2. Método Heurístico

Em muitos casos, a otimização exata não é possível ou simplesmente não é eficiente o suficiente para gerar soluções no tempo razoável para as necessidades da aplicação. Nesses casos, prefere-se uma solução relativamente boa, utilizando-se os métodos heurísticos.

Heurísticos são algoritmos que não buscam diretamente a otimização pura, mas geram soluções aceitáveis ("boas soluções"). São utilizadas por serem computacionalmente mais eficientes e/ou fáceis de serem implementadas. Entretanto, em alguns casos, elas podem não ser muito precisas ou previsíveis. Se um problema é resolvido repetitivamente e os parâmetros se alteram constantemente, as chances de falha de uma heurística são consideravelmente maiores. Outra característica de um algoritmo heurístico é o de que ele sempre gera uma resposta para o problema, mas algumas vezes essas soluções não são de boa qualidade. Apesar dessas características, muitas vezes a performance de uma heurística pode ser melhorada através da incorporação de algoritmos localizados de otimização. Soluções melhores são geradas para um subconjunto de condições utilizando alguns passos de otimização local. Contudo, a otimização pura é a única garantia de se encontrar a melhor solução (menor valor da função objetivo) para todos os parâmetros de um problema.

Geralmente são requeridas as seguintes características dos algoritmos heurísticos (MIRCHANDANI & FRANCIS, 1990):

- Proximidade da solução ótima;
- Varias soluções factíveis para se fazer uma análise da melhor delas;
- Fácil implementação e pouco espaço de armazenamento;
- Devem apresentar um baixo tempo computacional quando comparado com os métodos exatos.

Dentre os métodos heurísticos mais conhecidos podem-se destacar: Algoritmo Genético, Algoritmo de *Simulated Annealing*, Método da Colônia de Formigas, Scatter Search, Busca Tabu, etc (FRANCEIRA, 2001).

5.3. Algoritmo de *Simulated Annealing*

A resolução do problema de otimização nesse trabalho foi feita utilizando-se o algoritmo de *Simulated Annealing* (SA), conforme descrito por AARTS & KORST (1989). A escolha desse algoritmo foi feita por ter as características de facilidade e simplicidade de uso, resultando em uma boa solução em pouco tempo computacional.

O termo "*Annealing*" refere-se à forma como metais líquidos são esfriados vagarosamente de forma a minimizar a energia de estrutura sólida altamente regular. O algoritmo é baseado nas técnicas de Monte Carlo e gera a seqüência de estados do sólido até o equilíbrio. Dado um estado corrente i do sólido com energia E_i , então o estado subsequente j é gerado por um mecanismo de perturbação. A energia do próximo estado é E_j . Se a diferença de energia, $E_j - E_i$ for menor ou igual a 0, o estado j será aceito como o estado corrente. Se a diferença de energia for maior que 0, o estado j será aceito com uma certa probabilidade, a qual é dada por:

$$P = \exp\left(\frac{E_i - E_j}{k_B T}\right) \quad (5.1)$$

onde T é a temperatura do banho de calor e k_B a constante de Boltzmann.

A regra de aceitação descrita acima é conhecida como critério de Metropolis. Se a diminuição da temperatura for feita lentamente, o sólido poderá alcançar o equilíbrio térmico em cada temperatura. No algoritmo de Metropolis isto é registrado através da geração de um grande número de transições em uma dada temperatura.

O algoritmo *Simulated Annealing* (SA) é um processo similar ao *annealing*. O algoritmo de SA pode ser encarado como um algoritmo que "esfria" vagarosamente a solução para garantir que ela possua a menor função objetivo possível. Por garantir um alto nível de movimentação através do espaço de busca, o SA busca varrer todo esse espaço, de forma a permitir uma solução global. Mais tarde no processo, o resfriamento permitirá apenas pequenos movimentos no espaço de soluções, e o processo converge finalmente para uma solução final. A natureza de movimentos através do processo significa que uma vez que o processo "resfrie", a solução é movida para uma área com menor valor objetivo possível.

O SA pode ser entendido como o problema de se encontrar, dentre um número potencialmente grande de soluções, a que representa o menor custo. Há uma correspondência entre a função custo e a energia livre, entre as soluções e os estados físicos, e o parâmetro de controle e a temperatura.

Uma característica típica do algoritmo de SA é que além de aceitar soluções que representam melhoramentos no custo, também aceita "deteriorações" (soluções com custo maior) com um certo limite. Inicialmente, para grandes valores de c_k , muitas deteriorações serão aceitas; quando c_k diminuir, poucas deteriorações serão aceitas e finalmente, quando

o valor de c_k se aproximar de zero, nenhuma deterioração será aceita. Esta característica faz com que o algoritmo simulated annealing, em contraposição aos algoritmos de busca local, possa fugir do mínimo local e ainda exibir características favoráveis como simplicidade e aplicação geral.

Utilizando-se o algoritmo de Metropolis, gera-se uma seqüência de soluções, onde a transição de uma solução a para uma solução b é avaliada pelo critério de aceitação dado por (Aarts & Korst, 1989):

$$P = 1 \quad \text{se} \quad \Delta z \leq 0 \quad (5.2)$$

$$P = \exp(-\Delta z/c_k) \quad \text{se} \quad \Delta z > 0 \quad (5.3)$$

onde P é a probabilidade de aceitação da transição, $\Delta z = f(b) - f(a)$, $f(a)$ e $f(b)$ são os valores da função objetivo para as soluções a e b , e c_k é o parâmetro de controle do algoritmo de SA. Se P é maior que um número gerado aleatoriamente de uma distribuição uniforme no intervalo $[0,1)$, então a nova solução b é aceita; caso contrário, a solução a é mantida.

Para o problema de layout formulado como um problema de designação ou atribuição, a solução a é um dado arranjo geométrico de componentes que satisfaz as restrições dadas pelas equações (3.1) e (3.2). A nova solução b é obtida a partir de a pelo intercâmbio de posições de apenas dois componentes, escolhidos aleatoriamente, mantendo-se todos os outros na mesma posição. Para se evitar a troca de posições entre dois componentes fantasmas, o que não alteraria nada no layout real, o primeiro componente é escolhido arbitrariamente do conjunto de N_c componentes reais, enquanto o segundo componente é escolhido arbitrariamente do conjunto de N componentes (reais + fantasmas), excluindo-se o primeiro componente já escolhido do primeiro conjunto (pois também não alteraria nada). Dessa forma, o tamanho Θ da vizinhança de cada solução é:

$$\Theta = \frac{N_c \cdot (N_c - 1)}{2} + N_c \cdot (N - N_c) \quad (5.4)$$

Se $c_k = 0$, o resultado seria o algoritmo de intercâmbio de pares (Love et al, 1988), que não aceita nenhuma solução nova se $f(b) > f(a)$, e pode assim ficar preso em um ótimo local. Uma implementação em tempo finito do algoritmo de SA, que pode evitar esses ótimos locais, pode ser feita pela geração de uma cadeia homogênea de Markov de comprimento finito (L_k), para uma seqüência finita de valores decrescentes do parâmetro de controle (c_k). O decréscimo do parâmetro de controle é calculado usando-se o parâmetro de distância δ .

A aplicação do SA requer especificação de parâmetros que determinam o *cooling schedule* (programa de resfriamento). O programa de resfriamento especifica:

- a seqüência finita dos valores do parâmetro de controle (c_k);
- um valor inicial do parâmetro de controle (c_0);
- uma função decaimento para diminuição do valor do parâmetro de controle;
- um valor final para o parâmetro de controle especificada por um critério de parada;
- um número finito de transições para cada valor do parâmetro de controle;
- um comprimento finito para cada cadeia de Markov (L_k).

O algoritmo usado nesse trabalho é baseado no algoritmo descrito por Aarts & Korst (1989), usando uma razão de aceitação inicial de 99% ($\chi_0 = 0.99$), o parâmetro de

parada dado por $\varepsilon_s = 0.00001$, e o comprimento de cada cadeia de Markov (para cada valor de c_k) igual a 4 vezes o tamanho Θ (dado pela equação 5.4) da vizinhança de cada arranjo geométrico. Diversos valores de parâmetro de distância δ foram testados nas simulações numéricas.

As expressões para o valor inicial do parâmetro de controle (c_0), o valor da razão de aceitação (χ), o decaimento do parâmetro de controle (c_k) desenvolvidas por Aarts & Van Larrhoven são as seguintes:

$$\chi = \frac{\text{número de transições aceitas}}{\text{número de transições propostas}} \quad (5.5)$$

$$\chi = \frac{m_1 + m_3}{m_1 + m_2} \quad (5.6)$$

$$c_0 = \frac{W_m}{\log m_2 \cdot \left(\frac{m_2}{m_2 \cdot \chi_0 - m_1 \cdot (1 - \chi_0)} \right)} \quad (5.7)$$

$$c_{k+1} = \frac{c_k}{1 + \frac{c \cdot \ln(1 + \delta)}{3 \cdot \sigma_{ck}}} \quad k = 1, K, \Theta \quad (5.8)$$

onde:

W_m média dos valores do incremento Δz após as transições;

m_1 número de transições que apresentam um custo menor que a disposição anterior;

m_2 número de transições que apresentam um custo maior que a disposição anterior;

m_3 número de transições que apresentam um custo maior que a disposição anterior, mas são aceitas com certa probabilidade;

σ_{ck} desvio padrão das distribuições (calculada durante a resolução do algoritmo);

δ parâmetro de distância.

O algoritmo de AS não garante encontrar a solução global, a não ser que a cadeia de Markov fosse infinita. Entretanto, a experiência tem mostrado que as repostas obtidas são de boa qualidade (próximas do valor ótimo).

5.4. Cálculo da Função Objetivo

Para a aplicação do algoritmo de SA, a função objetivo precisa ser calculada para um dado arranjo geométrico de layout. Substituindo-se a equação (4.1) na equação (3.1) e utilizando-se as restrições (3.2) e (3.3), o resultado é:

$$z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \left[\sum_{m=1}^5 c_{ij}^{(m)} \cdot d_{kl}^{(m)} \right] \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N b_{ik} \cdot x_{ik} \quad (5.9)$$

A equação (5.9) requer muito tempo computacional, o que limita a eficiência de qualquer algoritmo. Uma maneira mais rápida e eficiente é o cálculo da diferença Δz entre transições, uma vez que apenas dois componentes estão em posições diferentes em cada transição. Primeiramente, definiu-se um vetor \mathbf{p} tal que $p(i) = k$ se $x_{ik} = 1$. A função objetivo pode então ser escrita como:

$$z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[\sum_{m=1}^5 c_{ij}^{(m)} \cdot d_{p(i),p(j)}^{(m)} \right] + \sum_{i=1}^N b_{i,p(i)} \quad (5.10)$$

o qual não utiliza as variáveis binárias, uma vez que já utiliza um arranjo factível de posições (ou seja, que respeita as restrições dadas pelas equações (3.2) e (3.3) do problema de designação).

Então, considerar que o componente $i1$ na posição $k1 = p(i1)$ troca de posição com o componente $i2$ na posição $k2 = p(i2)$. A diferença no valor da função objetivo devido a essa troca de posições é dada por:

$$\Delta z = \Delta z_1 + \Delta z_2 + \Delta z_3 + \Delta z_4 \quad (5.11)$$

$$\Delta z_1 = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i1, i2}}^N \left[\sum_{m=1}^5 (c_{i1,j}^{(m)} - c_{i2,j}^{(m)}) \cdot (d_{k2,l}^{(m)} - d_{k1,l}^{(m)}) \right] \quad (5.12)$$

$$\Delta z_2 = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i1, i2}}^N \left[\sum_{m=1}^5 (c_{j,i1}^{(m)} - c_{j,i2}^{(m)}) \cdot (d_{l,k2}^{(m)} - d_{l,k1}^{(m)}) \right] \quad (5.13)$$

$$\Delta z_3 = \left[\sum_{m=1}^5 (c_{i1,i2}^{(m)} - c_{i2,i1}^{(m)}) \cdot (d_{k2,k1}^{(m)} - d_{k1,k2}^{(m)}) \right] \quad (5.14)$$

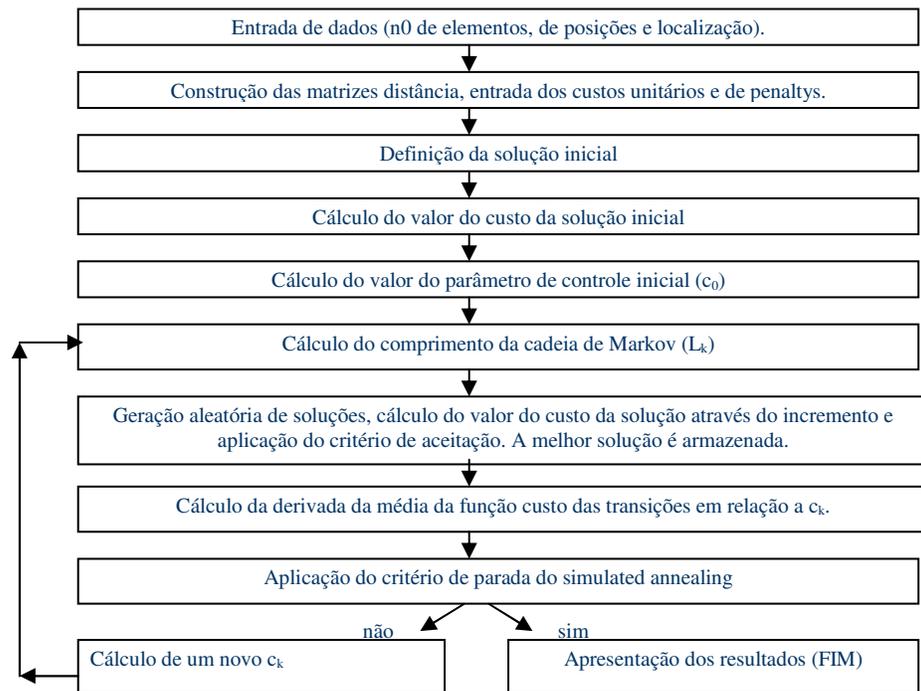
$$\Delta z_4 = (b_{i1,k2} - b_{i1,k1}) + (b_{i2,k1} - b_{i2,k2}) \quad (5.15)$$

onde $l = p(j)$. Uma vez que as somatórias nas equações (5.12) e (5.13) não incluem os casos $j = i1$ e $j = i2$, isso é considerado na equação (5.14) para compensar.

A equação (5.11) é usada nas equações (5.2) e (5.3) para se testar se uma determinada transição será aceita ou não. Se aceita, então o valor de z é atualizado pela adição do valor de Δz . Caso contrário, o mesmo valor de z é mantido.

5.5. Implementação do Algoritmo

O algoritmo de SA, seguindo o procedimento descrito anteriormente, foi implementado em linguagem FORTRAN 90 e resolvido em microcomputador. Os resultados são apresentados no próximo capítulo.



Fluxograma: Seqüência das operações realizadas pelo algoritmo.

Capítulo 6

ESTUDO DE CASO

Neste capítulo, é apresentada a aplicação da metodologia proposta a um estudo de caso de otimização de layout de processos químicos, tendo como objetivo a demonstração da facilidade de sua aplicação e a sua utilidade como ferramenta para o desenvolvimento de *layouts* de plantas químicas.

6.1 Descrição do Processo

O estudo de caso escolhido foi o de uma planta de produção de poliéster, baseado no processo descrito por GUNN E AL-ASADI (1987), conforme a Figura 6.1. FRANCEIRA (2001) estudou esse mesmo exemplo, porém utilizando um número menor de componentes (18 componentes; 19 componentes com a divisão de um componente de dimensões maiores que a separação dos pontos), devido às limitações computacionais da época, enquanto que, neste trabalho, foi utilizado o número completo de equipamentos (50, conforme Tabela 6.1). A listagem dos equipamentos e da quantidade de cada um são apresentadas na Tabela 6.1.

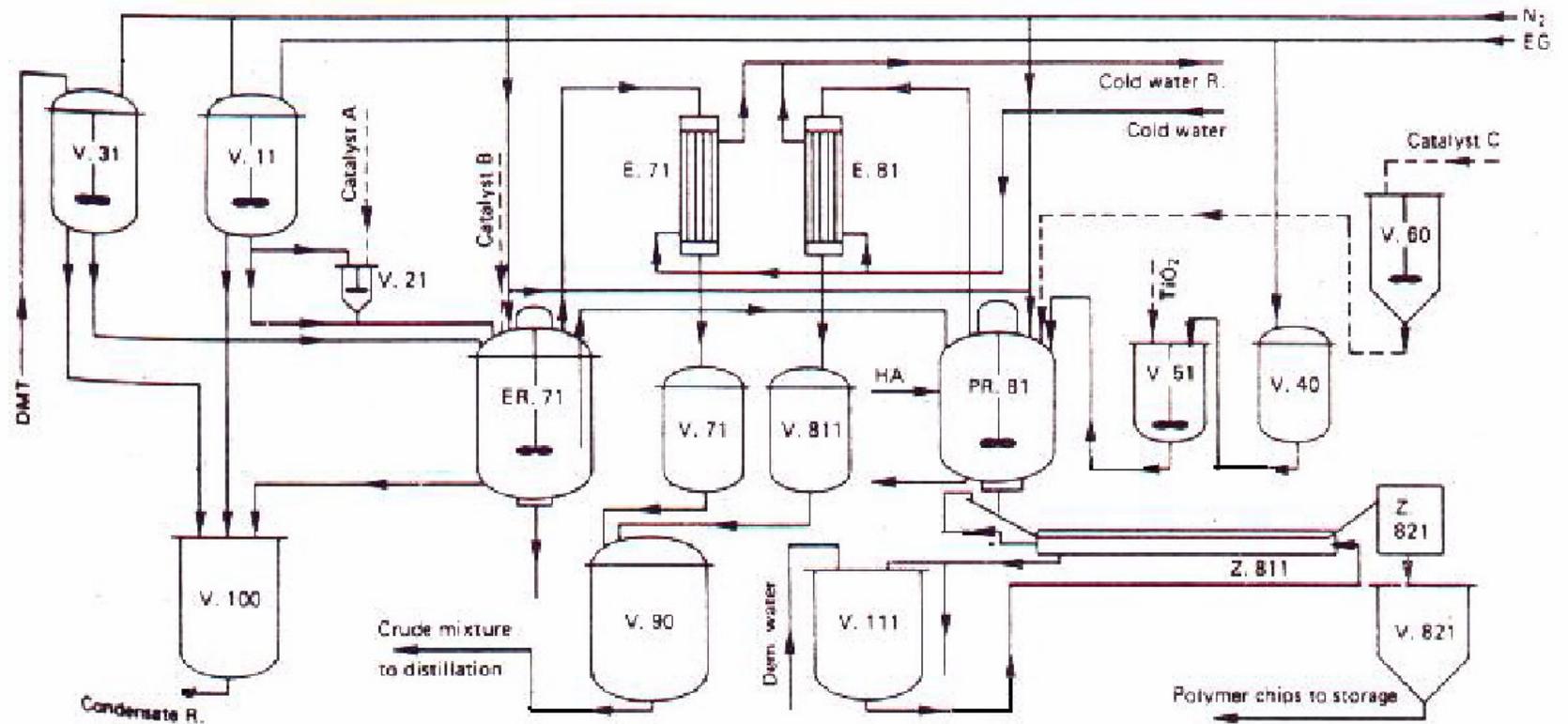


Figura 6.1: Fluxograma do processo de produção de Poliéster (GUNN & AL-ASADI, 1987).

Tabela 6.1: Identificação e quantidades de equipamentos.

Quantidade	Equipamentos	Descrição
2	Aquecedor de etilenoglicol (EG)	V 11
2	Vaso de Preparação do Cat A	V 21
2	Vaso de preparação do DMT	V 31
1	Vaso para Medida de DMT	V 40
3	Tanque para preparação de TiO ₂	V 51
1	Tanque de estocagem do Cat. B	V 60
4	Reator de Esterificação	ER 71
4	Reator de policondensação	PR 81
4	Coletor para etilenoglicol (EG) e água	V 71
4	Condensador do Etilenoglicol e Metanol	E 81
4	Coletor para Etilenoglicol (EG) e Metanol	V 811
4	Refrigerador	Z 811
4	Vaso para a coleta de chips	V 821
1	Vaso para a mistura fria	V 90
1	Tanque para armazenamento do condensador	V 100
1	Tanque de água	V 111
4	Slicer-dicer	Z 821
4	Condensador do Etilenoglicol e Metanol	E 71
50	Total	

Os principais reagentes envolvidos no processo são o etilenoglicol e o teraftalato de dimetila. Em uma primeira etapa, ocorre a reação do etilenoglicol com o teraftalato de dimetila, para formar o dietileno glicol teraftalato (como monômero) e metanol. Em uma segunda etapa ocorre a polimerização catalítica, onde o poliéster linear é formado.

Os principais estágios do processo são a preparação dos reagentes, a condensação e esterificação do teraftalato de dimetila, a policondensação do dietileno glicol teraftalato, e a preparação do poliéster.

O etileno glicol e o teraftalato de metila são bombeados para os tanques de armazenamento aquecidos. Nestes tanques são medidas as quantidades dos dois principais reagentes que alimentam os reatores de condensação e esterificação.

No reator de esterificação, são adicionados, em conjunto com os dois reagentes primários, dois catalisadores. O primeiro catalisador é colocado na solução de etilenoglicol, enquanto o segundo é adicionado diretamente ao reator de esterificação.

A reação de esterificação ocorre no reator tanque equipado com uma serpentina a vapor e uma jaqueta de aquecimento. O metanol condensado na reação é resfriado e coletado da emissão de vapores do reator. No vapor também há uma pequena quantidade de etilenoglicol. O início da reação está na faixa de temperatura entre 160-180°C, e depois de um período há uma elevação de temperatura entre 240-250°C. O tempo total da reação é de, aproximadamente, 5 horas. No primeiro estágio da reação, o metanol é destilado completamente, mas com a elevação da temperatura (250°C) o excesso do etilenoglicol é destilado também. A reação de esterificação é conduzida em presença de nitrogênio para evitar a oxidação dos produtos e manter as condições de não inflamabilidade sobre os reagentes líquidos.

O éster intermediário preparado no reator de esterificação é transferido para um reator de policondensação, agitado por pressurização com nitrogênio. O reator de policondensação é aquecido através de uma jaqueta por um fluido orgânico aquecido, e neste estágio a temperatura sofre um aumento até 260°C, onde um terceiro catalisador (trióxido de antimônio ou naftenato manganoso) é adicionado.

Dependendo do poliéster requerido, dióxido de titânio (agente deslustrante) é adicionado, em uma concentração de 2% do polímero final. Para a preparação da pasta de dióxido de titânio, utiliza-se uma quantidade do etilenoglicol concentrado. Depois da preparação e agitação, a pasta é transferida para um tanque de armazenamento onde ocorre a medição e então segue para o reator de policondensação. A polimerização ocorre com a condensação do etilenoglicol, na temperatura entre 280-300°C e a uma pressão entre 0,1-10 mmHg (vácuo).

O tempo de reação dura até 5 horas para alcançar o peso molecular desejado, sendo este monitorado pela viscosidade do polímero derretido com a amostra da condensação em agitação no reator.

O etilenoglicol e uma parte do metanol são coletados durante a reação. Ambos são recuperados em uma planta separada, onde o glicol é utilizado no processo, enquanto o metanol é usado na produção do teraftalato de dimetila.

Quando a policondensação está completa, o polímero derretido é forçado a passar através de uma válvula de extrusão, localizada na base do reator, por pressurização do reator com nitrogênio. O polímero é extraído na forma de cabos. Posteriormente é parcialmente seco por uma corrente de ar, cortado em chips por um slice-dicer, seguindo para o vaso de coleta dos chips. Depois de testados, os chips do polímero formado são pneumaticamente transportados e estocados.

6.2 Obtenção das matrizes

A otimização do layout da planta de produção de poliéster, utilizando o modelo na forma de QAP, requer um conhecimento do fluxograma do processo e das dimensões dos equipamentos e tubos. Na referência original, GUNN & AL-ASADI não apresentam as dimensões dos equipamentos, nem detalhes de materiais de construção dos equipamentos, de tal forma que nesse trabalho elas foram arbitradas, seguindo o mesmo procedimento descrito por FRANCEIRA (2001). Apesar dessa limitação, a importância deste trabalho é

mostrar que a metodologia estudada pode ser eficientemente utilizada em um problema de layout industrial em escala igual ao de problemas reais.

O detalhamento do cálculo dos custos envolvidos, das dimensões dos equipamentos, e das distâncias de segurança entre estes, estão apresentados nos Anexos. Neste capítulo, apresenta-se uma descrição geral da sistemática adotada para a obtenção dos valores. Todos os detalhes do problema são utilizados na definição das matrizes do QAP.

6.2.1. Distância entre os pontos da malha de posições possíveis

Definiu-se uma malha cúbica para as possíveis posições dos equipamentos, sendo que cada ponto da malha estará localizado a uma distância de 5 metros do seguinte. Este valor foi escolhido arbitrariamente e representa um valor mínimo para evitar sobreposição (*overlap*) de equipamentos e também atender a requisitos de distância mínima de segurança entre equipamentos.

6.2.2. Distância mínima entre equipamentos

Tabelas com valores de distância mínima de segurança entre equipamentos são disponíveis na literatura (Anderson, 1982; Meckleburgh, 1985). Como os equipamentos deste estudo de caso são de dimensões reduzidas, para a maior parte das situações a distância entre posições adjacentes pode ser considerada uma distância mínima de segurança.

No entanto, considerou-se que os reatores de esterificação (equipamentos 12, 13, 14 e 15) e os reatores de poli-condensação (equipamentos 16, 17, 18 e 19) devem ficar a uma distância de no mínimo 10 m dos demais equipamentos, ou seja, não podem estar em posições adjacentes na malha.

Para obrigá-los a permanecerem a uma distância mínima de segurança, definiu-se um custo de penalidade, conforme a matriz $c_{ij}^{(4)}$:

$$\begin{cases} C_{12,j}^{(4)} = M, & C_{16,j}^{(4)} = M, & \text{para } j \in \{1,62\} \\ C_{i,12}^{(4)} = M, & C_{i,16}^{(4)} = M, & \text{para } i \in \{1,62\} \end{cases}$$

Desta forma, se os equipamentos 12 e 16 estiverem a uma distância menor que 10 metros dos equipamentos reais, uma penalidade de valor M será adicionada na função objetivo. Isso vai se repetir para os equipamentos 13, 14, 15 e 17, 18, 19 respectivamente.

6.2.3. Custos unitários de tubulação

Os custos por unidade de comprimento de tubulação foram obtidos a partir de informação disponível na literatura (GUTHRIE, 1974; PETERS & TIMMERHAUS, 1991). Os custos relacionados à tubulação foram obtidos a partir de figuras fornecidas por Guthrie (1974), de acordo com a equação 6.1:

$$C = C_b \cdot (F_c + F_m + F_t + F_p) \quad (6.1)$$

onde:

C = custo unitário de tubulação em 1970 (US\$/ft);

C_b = custo base (Figura do Anexo 2);

F = fatores de ajuste (Tabelas 1, 2, 3, 4 do Anexo 2).

Neste trabalho, optou-se por um sistema de tubulação para plantas de processos, um circuito normal ($F_c = 1$) com paredes extrafortes e flanges ($F_f = 0,38$).

Uma vez que essas referências são de um ano específico, para se fazer a sua atualização para outros anos foi utilizada a equação (6.2):

$$C_1 = C_0 \cdot \frac{I_1}{I_0} \quad (6.2)$$

onde:

C_0 = custo original em US\$;

C_1 = custo atualizado em US\$;

I_0 = índice passado;

I_1 = índice atualizado.

Os índices foram obtidos da revista Chemical Engineering.

6.2.4. Custos unitários de bombeamento

Os custos de bombeamento dependem da energia consumida no bombeamento, que pode ser calculada pela 1ª Lei da termodinâmica, de acordo com a equação (6.3):

$$\dot{W} = \dot{m} \cdot f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2} + \dot{m} \cdot g \cdot \Delta h \quad (6.3)$$

onde:

\dot{W} é a energia de bombeamento,

\dot{m} é a vazão mássica do escoamento,

f é o fator de atrito,

L é o comprimento do tubo,

D é o diâmetro do tubo,

v é a velocidade do fluido dentro do tubo,

Δh é a diferença de altura entre os pontos final e inicial,

g é a aceleração da gravidade.

O uso da equação (6.3) na definição das matrizes dependerá se o bombeamento for de baixo para cima ou de cima para baixo, ou se o escoamento ocorrer na direção horizontal.

Uma vez que custo de energia é um custo de operação, enquanto custo de tubulação é um custo fixo, adotou-se um período de tempo de cinco (05) anos de operação da planta, para que esses custos pudessem ser incluídos na mesma função objetivo.

Considerou-se uma eficiência de 60% para as bombas e um custo de energia elétrica conforme o custo de kWh fornecido na cidade de São Paulo.

6.2.5. Custos de posicionamento

Os custos de posicionamento dependem da necessidade ou não de suporte, do custo de investimento para se colocar o equipamento em determinada posição, e a proximidade do equipamento do *pipe-rack* (entradas e saídas de reagentes, produtos e utilidades).

Os custos de suporte podem ser calculados por meio de gráficos dados em Guthrie (1974), onde o custo de suporte depende do volume da estrutura do suporte de acordo com a equação (6.4):

$$C_s = C_v \cdot A \cdot H \cdot F_s \quad (6.4)$$

onde:

C_s é o custo do suporte,

C_v é o custo por unidade de volume da estrutura do suporte,

A é a área do suporte,

H é a altura do suporte,

F_s é um fator de instalação.

O fator de instalação (F_s) depende do peso do objeto suportado. Para este trabalho, foi utilizada a curva “light” (Guthrie, 1974). A construção da matriz b_{ik} exige a obtenção de valores de F_s para um grande número de posições diferentes. Para representar os custos de suporte no algoritmo, a curva “light” foi aproximada a uma equação do tipo $y = a \cdot H^b$ utilizando-se o software Origin. O resultado obtido é dado pela equação (6.5):

$$F_s = 0,1110 \cdot H^{0,3334} \quad (6.5)$$

A atualização dos dados de custo de Guthrie (1974) para outros anos foi feita utilizando-se a equação (6.2).

A matriz b_{ik} é obtida pela somatória dos custos de suporte com os custos de tubulação e bombeamento do equipamento até a posição da entrada ou saída de materiais (*pipe-rack*), se foro caso de um equipamento que recebe ou envia algum tipo de material para o exterior da planta.

6.2.6. Restrições do processo

As restrições do layout são incorporadas ao problema de otimização por meio de penalidades (valor M). As seguintes restrições foram consideradas no estudo de caso:

➤ Os equipamentos 32, 33, 34 e 35 são mais longos na horizontal que os demais, de tal forma que não podem ser alocados para uma única posição na malha, uma vez que suas dimensões são maiores que 5m. Dessa forma, esses equipamentos foram divididos em duas partes cada. Assim, os elementos 32-63, 33-64, 34-65 e 35-66, representam respectivamente um único equipamento (63, 64, 65 e 66 são as outras metades desses equipamentos). Para obrigar essas partes a permanecerem próximas, utilizou-se a matriz de penalidades $c_{ij}^{(5)}$. Toda vez que as partes 32-63, 33-64, 34-65 e 35-66 forem designados para posições não adjacentes no eixo x , um valor M será adicionado na função objetivo.

➤ Para evitar a obtenção de *layouts* sem sentido físico, dados certos pares de elementos i e j , é possível obrigar o elemento i a ficar acima do elemento j através da adição de um custo de penalidade na função objetivo. Com base no sentido do fluxo foram impostas algumas restrições: se o fluxo for de i para j , será mais vantajoso i ficar acima de j . Dessa forma, foram estabelecidos os seguintes custos de penalidade relacionados à matriz $c_{ij}^{(3)}$:

$$c_{1,12}^{(3)} = M$$

$$c_{5,12}^{(3)} = M$$

$$c_{12,41}^{(3)} = M$$

$$c_{12,36}^{(3)} = M$$

$$c_{16,36}^{(3)} = M$$

$$c_{16,32}^{(3)} = M$$

$$c_{24,16}^{(3)} = M$$

$$c_{42,36}^{(3)} = M$$

$$c_{47,12}^{(3)} = M$$

Para os casos acima listados, se uma configuração alocar i em uma posição abaixo de j , uma penalidade de valor M será adicionada na função objetivo.

Capítulo 7

RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1. Descrição da Implementação dos Testes

O estudo de caso descrito no Capítulo 6 apresenta 50 equipamentos reais. Uma vez que 4 equipamentos têm dimensões maiores, estes foram divididos em duas partes cada, resultando assim em um problema com 54 equipamentos reais, uma vez que as partes divididas ocupam espaço e têm custos associados (suporte, tubulação, etc.).

Foi definida a posição de um *pipe-rack*, onde estão localizadas as posições de entrada e saída de materiais (reagentes, produtos, utilidades). Essas posições estão apresentados nos Anexos.

O algoritmo utilizado foi o *Simulated Annealing*, implementado em um programa com linguagem Fortran, sendo todos os cálculos executados em um micro PC XP2400 1.99GHz e 480Mb de memória RAM, para a resolução do problema.

7.2. Malhas Testadas - Resultados

Para a realização dos testes de otimização do layout do estudo de caso, foram consideradas malhas de posições com tamanhos diferentes, de tal forma a dar flexibilidade ao problema de QAP.

Para a execução do algoritmo de AS, foram variados diversos parâmetros, em particular δ , com o objetivo de se verificar a eficiência do algoritmo em determinar o menor custo da função objetivo.

Na definição das penalidades, foram testados valores diferentes de M , para se verificar se esse valor estava adequado. Além disso, é também uma forma de se verificar se alguma penalidade está ou não sendo violada (caso Z ótimo seja menor que M , não há violação de nenhuma penalidade).

A Tabela 7.1 apresenta os resultados para malhas diferentes, utilizando um valor de M igual a 100000 e δ igual a 0,30. A Tabela 7.2 apresenta os resultados para valores diferentes de δ usando malha 5x5x5 (125 posições) e valor de M igual a 100000. A Tabela 7.3 apresenta os resultados para valores diferentes de M usando uma malha 5x5x5 e δ igual a 0,30.

Tabela 7.1 - Melhores valores encontrados para malhas diferentes ($\delta = 0,30$ e $M=100000$)

Malha	Z final	tempo CPU (s)
5x5x5	112.645,47	95
6x6x6	118.476,81	383
7x7x7	113.739,19	1025

Tabela 7.2. Melhores valores encontrados para diferentes δ (malha 5x5x5 e $M=100000$)

δ	Z final	tempo CPU (s)
0,05	109.025,56	497
0,10	113.713,96	259
0,30	112.645,47	95

Tabela 7.3. Melhores valores encontrados para diferentes M (malha 5x5x5 e $\delta = 0,30$)

M	Z final	tempo CPU (s)
50000	115.069,58	95
100000	112.645,47	95
200000	114.727,88	120

Conforme pode se observar pelas Tabelas 7.1, 7.2 e 7.3, a malha 5x5x5 resultou no menor valor encontrado da função objetivo, sem violar nenhuma penalidade (nenhuma violação das restrições de layout), para o caso de $\delta = 0,05$ e $M = 100000$. Os resultados encontrados com as malhas 6x6x6 e 7x7x7 resultaram em valores maiores da função objetivo (também sem violar nenhuma penalidade), o que indica que esses valores não correspondem à solução ótima, uma vez que as malhas 6x6x6 e 7x7x7 incluem a malha 5x5x5 como um caso particular e deveriam resultar em valores melhores ou pelo menos iguais. Mesmo assim, o algoritmo de SA não garante que aquela solução encontrada para o caso 5x5x5 seja a melhor possível, devido à natureza heurística desse algoritmo.

Os custos de tubulação e suportes de equipamentos tiveram uma grande influência no valor da função objetivo, comparados a outros custos. Como consequência, a otimização layout levou à colocação desses equipamentos próximos ao *pipe-rack* (pontos de entrada e saída de materiais) e próximos uns dos outros. Observou-se, também, que muitos equipamentos foram posicionados próximos à base ou na parte mais baixa da malha, de tal forma a minimizar os custos de suportes de equipamentos.

As posições encontradas para o caso de menor valor de Z estão apresentadas na Tabela 7.4 (malha 5x5x5, $\delta = 0,05$ e $M = 100000$). Não se apresenta aqui uma figura desse *layout* devido à dificuldade de visualização do mesmo com tantos equipamentos.

Tabela 7.4: Posições dos equipamentos - caso da malha 5x5x5 ($\delta = 0,05$ e $M = 100000$).

Equipamentos	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)
1	10	0	20
2	15	0	20
3	20	0	10
4	15	0	5
5	20	5	20
6	20	0	20
7	0	20	0
8	20	10	0
9	20	10	10
10	20	5	0
11	20	5	5
12	5	0	5
13	20	15	5
14	15	10	5
15	10	5	5
16	0	5	5
17	15	15	10
18	15	20	5
19	10	15	5
20	20	0	15
21	20	5	10
22	20	10	15

Tabela 7.4: Posições dos equipamentos - caso da malha 5x5x5 ($\delta = 0,05$ e $M = 100000$).

Equipamentos	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)
23	20	5	15
24	15	0	10
25	15	0	15
26	15	5	10
27	10	0	10
28	5	20	5
29	5	15	10
30	0	0	10
31	0	10	10
32	0	10	0
33	15	15	0
34	10	20	0
35	5	15	0
36	20	0	0
37	15	5	0
38	15	0	0
39	10	0	0
40	5	10	5
41	5	5	0
42	20	0	5
43	5	20	0
44	20	20	0

Tabela 7.4: Posições dos equipamentos - caso da malha 5x5x5 ($\delta = 0,05$ e $M = 100000$).

Equipamentos	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)
45	0	0	0
46	0	15	5
47	10	0	15
48	15	5	15
49	15	10	15
50	10	5	15
51	5	0	15
52	5	5	10
53	10	10	15
54	10	10	10
55	0	20	5
56	20	20	10
57	10	20	10
58	20	15	15
59	5	10	0
60	5	10	15
61	5	10	10
62	10	10	0

7.3. Estudo de Desempenho do Algoritmo de SA

Neste item apresentam-se gráficos mostrando o comportamento da função objetivo e de outros parâmetros utilizados no algoritmo de SA. Escolheu-se como exemplo os resultados para o caso da malha 5x5x5, com $\delta = 0,05$ e $M = 100000$. Os resultados para outros casos testados foram semelhantes e estão apresentados em Anexo.

Na Figura 7.1 apresenta-se o custo médio em função do valor do parâmetro de controle c_k . Observar que durante a execução do algoritmo o valor de c_k vai diminuindo, de tal forma que o gráfico deve ser interpretado da direita para a esquerda. O valor de Z médio é obtido para cada valor de c_k , dividindo-se a soma de todos os Z obtidos durante a execução da cadeia de Markov pelo comprimento da cadeia. Observa-se pela Figura 7.1 que o valor de Z médio diminui com a diminuição de c_k , o que é esperado.

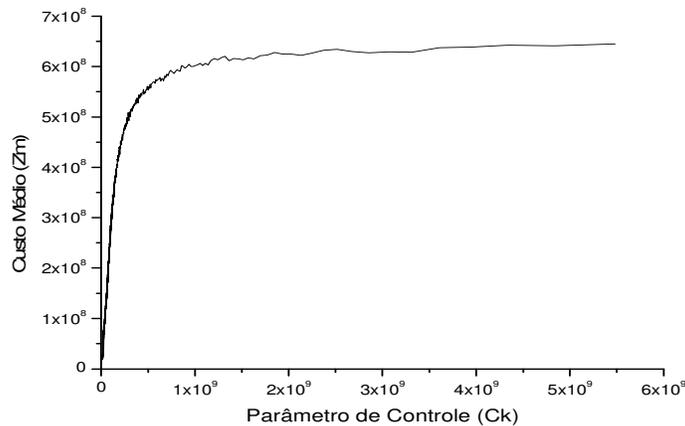


Figura 7.1: Variação do custo médio (Z_m) em função do parâmetro de controle (c_k).

Na figura 7.2 apresenta-se a razão de aceitação (χ) em função do valor do parâmetro de controle c_k . Novamente, observar que o gráfico deve ser interpretado da direita para a esquerda. Observa-se pela Figura 7.2 que a taxa de aceitação diminui com o valor de c_k , o que é esperado: quanto menor o valor do parâmetro de controle, menor a probabilidade de aceitação de transições ruins pelo algoritmo de SA.

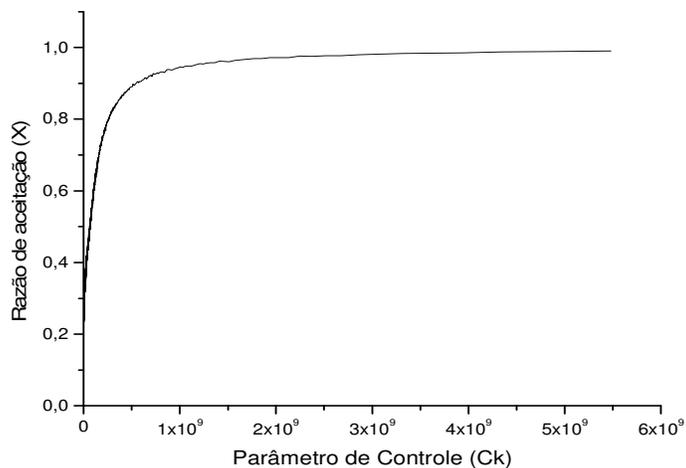


Figura 7.2: Variação da razão de aceitação (χ) em função do parâmetro de controle (c_k).

Na Figura 7.3 apresenta-se a variação da derivada relativa do valor de Z médio (DR) em função do valor do parâmetro de controle (c_k). Essa derivada é utilizada no critério de parada do algoritmo de AS, e seu valor é calculado em função de uma curva polinomial ajustada de Z médio em função de c_k , uma vez que a curva real tem muitas flutuações devido à natureza estocástica do algoritmo.

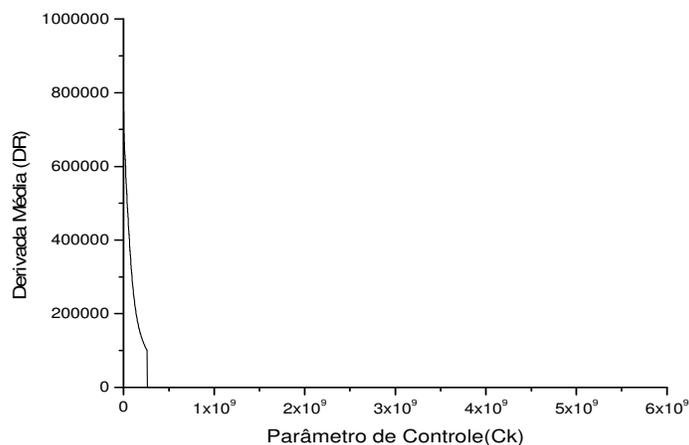


Figura 7.3: Variação da derivada relativa de Z médio (DR) em função de c_k .

Na Figura 7.4 apresenta-se a variação do desvio padrão médio da função objetivo (σ) em função do valor do parâmetro de controle (c_k). O desvio padrão é calculado para cada valor de c_k , sendo seu valor uma medida da flutuação dos valores de Z aceitos em torno do valor médio de Z para cada cadeia de Markov. Pode-se observar pela Figura 7.4 que o valor de σ diminui conforme o valor de c_k também diminui, o que é esperado, indicando que o valor de Z tende a um mínimo, devido a uma menor taxa de aceitação.

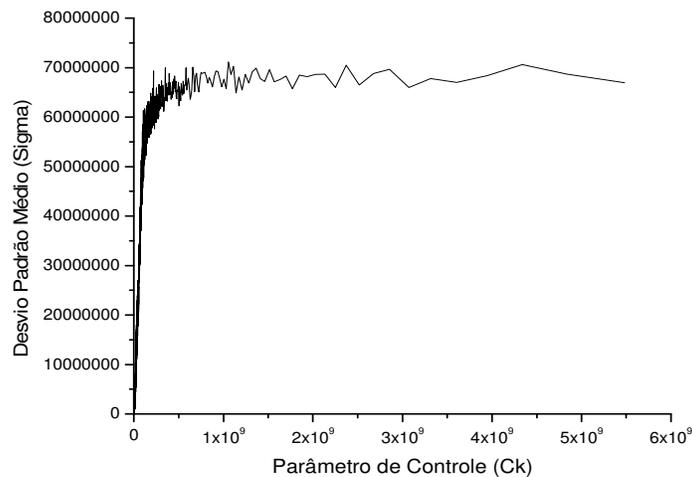


Figura 7.4: Variação do desvio padrão médio (σ) em função de c_k .

Dessa forma, pode-se concluir que o desempenho do algoritmo de *Simulated Annealing* está perfeitamente adequado, com resultados todos dentro do esperado por este método.

7.4. Análise dos Resultados

Os resultados obtidos indicaram que a metodologia proposta foi bem sucedida na otimização do layout de uma planta com um número grande de equipamentos, encontrando uma boa solução (não necessariamente a melhor possível) em um tempo pequeno. É importante ressaltar que para o tamanho de problema considerado nesse estudo de caso, o uso de métodos exatos para a otimização do layout é impraticável, devido ao excessivo tempo de cálculo para se chegar à solução ótima ou mesmo uma solução apenas boa.

O layout obtido pela metodologia proposta não é ainda um layout final, uma vez que não leva em conta muitos detalhes, como válvulas, instrumentação, desvios da tubulação, etc. Entretanto, é uma ferramenta útil para fornecer layouts iniciais que poderão ser usados na elaboração de outros mais detalhados.

O uso de malhas de posições pré-definidas facilita a resolução do problema de layout, embora possa limitar o número de possibilidades. Para isso, a escolha da malha deve ser a mais flexível possível. Para o estudo de caso testado, o uso de malhas maiores ofereceu maior flexibilidade, mas curiosamente não levou a uma solução melhor. Isso se deve tanto a limitações no algoritmo de SA, quanto a um aumento no número de possibilidades a serem examinadas. Uma estratégia que pode ser adotada é começar com malhas pequenas (em número de posições, não em distância entre pontos adjacentes) e gradativamente ir aumentando o tamanho das malhas (número de posições), até que não se obtenha uma melhora nos resultados, sem, no entanto, aumentar exageradamente o tempo de cálculo.

Capítulo 8

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos com o estudo de caso indicaram que a abordagem proposta é eficiente em encontrar um bom *layout* para uma planta com grande número de equipamentos em um tempo de cálculo aceitável. O uso de métodos exatos para a otimização de layout de plantas com grande número de equipamentos ainda é impraticável e o uso de métodos de busca estocástica (como o *Simulated Annealing*) é uma necessidade para a resolução de problemas desse tipo.

Algumas vantagens apresentadas na resolução do problema de otimização utilizando o algoritmo de *Simulated Annealing* sabem-se que este método não depende da qualidade da solução inicial, pode ser escolhida sem nenhum critério (arbitrariamente) onde o programa gera aleatoriamente solução inicial e o algoritmo aceita soluções melhores ou piores com uma certa probabilidade, que diminui com o decaimento do parâmetro de controle, por esta razão pode fugir de mínimos locais.

O algoritmo apresenta fácil implementação e baixo tempo de execução;

O método tem grande aplicabilidade, podendo ser utilizado para otimização de qualquer tipo de planta química com qualquer número de equipamento.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se testar a abordagem proposta para estudos de casos ainda maiores. Pode-se, ainda, utilizar outros algoritmos de busca estocástica, como o algoritmo genético, e comparar o resultado dos algoritmos para avaliar a qualidade da solução encontrada e a eficácia de cada algoritmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AART, E.; KORST. J., *Simulated Annealing and Boltzmann Machines*. John Wiley & Sons, Chichester - Great Britain, 1989.

AARTS, E.H.L.; VAN LAARHOVEN, P.J.M., *Statistical cooling: a general approach to combinatorial optimization problems*. Philips Journ. Op. Research, 40, 193-226,1985.

ABDOU, G. e DUTTA, S. P., *An integrated approach to facilities layout using expert systems*, International Journal of Production Research, Vol. 28, No. 4, 685 - 708, 1990.

ALOISE, D. et. al. *Heurísticas de colônia de formigas para o problema de otimização da alocação de sondas de produção terrestre*. In Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 33, 2001, São Paulo. Anais. São Paulo: DIMAP, 2001. p.13.

ANDERSON, F. V., *Plant Layout. In: Kirk-Othmer*. Encyclopedia of Chemical Technology, 3rd. Ed., 18, 23-43, 1982.

ANDRADE, C.E.; BATISTA, F.L.N.; TOSO, R.F., *Modelo de Otimização para Transporte de Cargas em Ambientes Reduzidos*. Monografia. Ciências da Computação. Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais - Brasil, 2004.

ARMOUR, G.C., e BUFFA, E.S., *A heuristic algorithm and simulation approach to relative allocation of facilities*. Management Science . Vol. 9, No 2, 294-300, 1963.

AUSTIN, George T., *Shreve's Chemical Process Industries*, 5th Edition. McGraw-Hill Book Company (1984).

AZADIVAR, Farhad; WANG, John (Jian), *Facility layout optimization using and genetic algorithms*. Int. J. Prod. Res., v. 38, n° 17, 4369-4383. 2000.

BADIRU, A. B. e ARIF, A., *FLEXPERT: facility layout expert system using fuzzy linguistic relationship codes*, IEE Transactions, 28, 295 - 308, 1996.

BANKS, J., *Introduction to Simulation*. Winter Simulation Conference Proceedings, 7-13, 1999.

BARBOSA-PÓVOA, A.P., MATEUS, R., & NOVAIS, A.Q., *Optimal two-dimensional layout of industrial facilities*. Int. J. Prod. Res., Vol. 39, No. 12, pp. 2567-2593, 2001.

BARBOSA-PÓVOA, A.P., MATEUS, R., & NOVAIS, A.Q., *Optimal 3D layout of industrial facilities*. Int. J. Prod. Res., Vol. 40, No. 7, pp. 1669-1698, 2002.

BARTÁK, R., *Constraint Programming: In Pursuit of the Holy Grail*. In Proceedings of WDS99 (invited lecture). Prague: 1999.

BLACK, J.T. *O projeto da fábrica com futuro*. Porto Alegre: Bookman, 1998.

BURKARD, R.E., *Quadratic Assignment Problems*. European Journal of Operational Research, 15, pp. 283-289, 1984.

BURKARD, R.E., KARISCH, S.E, & RENDL, F., QAPLIB- *A quadratic assignment problem library*. Technical Report n. 287, Technische Universitat Graz, 1994.

CHENIER, P. J., *Survey of Industrial Chemistry*, 2nd Revised Edition. VCH Publishers 1992.

CHIAVENATO, I. *Iniciação a Administração de Materiais*. São Paulo: Makron Books, 1991.

DORIGO, M., GAMBARDELLA, L., *Ant colonies for the traveling salesman problem*. Bruxelles: Université Libre de Bruxelles, 1997.

DORIGO, M.; CARO, DI; GAMBARDELLA, L.M., *Ant Algorithms for Discrete Optimization. Artificial Life*, 5(2), 137-172, 1999.

DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A., *The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, 26(1), 29-41, 1996.

EVANS, G.W.; WIHELM, M.R.; KARWOWSKI, W., *A layout design heuristic employing the theory of fuzzy sets*. International Journal of Production Research, v. 25, n°. 10, pp. 1431 – 1450, 1987.

FIORONI, M.M.; BATOCCHIO, A., *Arquitetura dos sistemas de manufatura*. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - Anais Rio Grande do Norte, p. 591. Cap. 12. Natal, agosto, 2000.

FRANCEIRA, S. N., *Otimização de Layout de Plantas Químicas utilizando o problema de designação quadrático*. Dissertação de Mestrado. UNICAMP, 2001.

FRANCIS, R. L.; WHITE, J. A. - *Facility layout and location: an analytical approach*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1974.

GAREY, M.R.; ROBINSON, D. S., *Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness*. New York: W. H. Freeman and Company, 1979.

GEORGIADIS, M.C., & MACCHIETTO, S., *Layout of process plants: a novel approach*. Computers Chem. Engng, Vol. 21, Suppl., pp. S337-S342, 1997.

GEORGIADIS, M.C., ROTSTEIN, G.E., & MACCHIETTO, S., *Optimal layout design in multipurpose batch plants*. Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 36, pp. 4852-4863, 1997.

GEORGIADIS, M.C., SCHILLING, G., ROTSTEIN, G.E., & MACCHIETTO, S., *A general mathematical programming approach for process plant layout*. *Computers chem. Engng*, Vol. 23, pp. 823-840, 1999.

GILMORE, P., *Optimal and suboptimal algorithms for the Quadratic Assignment Problem*. *Journal of SIAM*, 10, pp. 305-313, 1962.

GOLANY, B. e ROSENBLATT, M. J., *A heuristic algorithm for the quadratic assignment formulation to the plant layout problem*, *International Journal of Production Research*. Vol. 27, No. 2, pp. 293 - 308, 1989.

GOLDBARG, M. C.; H. P. Luna, *Otimização Combinatória e Programação Linear – Modelos e Algoritmos*. Editora Campus. Rio de Janeiro, RJ, 2000.

GONÇALVES, A.D.; DRUMMOND, L.M.A.; UCHOA, E.; CASTRO, M.C.S., *Algoritmo Branch-and-Bound Distribuído e Tolerante a Falhas para Grades Computacionais*, 2004.

GONÇALVES FILHO, E. V., *Arranjo Físico de fábrica: um modelo para o processo de projeto e um algoritmo genético para a formação de células de fabricação*. 133p. Tese (livre docência) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.

GUIRARDELLO, R., *Optimization of Process Plant Layout*. Tese de PhD, University of Wisconsin, Madison, 1993.

GUIRARDELLO, R., & SWANEY, R.E., *Optimization of process plant layout with pipe routing*, *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 30, pp. 99-114, 2005.

GUNN, D.J., & AL-ASADI, H.D., *Computer-aided layout of chemical plant: a computational method and case study*. *Computer Aided Design*, Vol. 19, No. 3, pp. 131-140, 1987.

GUTHRIE, K.M., *Process plant estimating, evaluation, and control*. Craftsman Book Company of American, San Francisco. 1974.

JAYAKUMAR, S., & REKLAITIS, G.V., *Chemical plant layout via graph partitioning – I. single level*. *Computers Chem. Engng*, Vol. 18, No. 5, pp. 441-458, 1994.

JAYAKUMAR, S., & REKLAITIS, G.V., *Chemical plant layout via graph partitioning – II. multiple levels*. *Computers Chem. Engng*, Vol. 20, No. 5, pp. 563-578, 1996.

HASSAN, M. M. D., *Machine layout problem In modern manufacturing facilities*. *International Journal of Production Research*. Vol. 32, No. 11, pp. 2559 - 2584, 1994.

HASSAN, M.D.M., *Toward re-engineering models and algorithms of facility layout*. *Omega: The International Journal of Management Science*. V.28, 711- 723, 2000.

HERAGU, S. S. e KUSIAK, A., *Machine layout : an optimization and Knowledge-based approach*. *International Journal of Production Research*. Vol. 28, No. 4, 615 - 635, 1990.

HERAGU, S. S.; KUSIAK, A., *Efficient models for the facility layout problem*. *European Journal of Operational Research*. 53, 1-13, 1991.

KAKU, B. K. , THOMPSON, G. L. e MORTON, T. E., *A hybrid heuristic for the facilities layout problem*, *Computers and Operations Research*. Vol. 18, No. 3, 241-253, 1991.

KERN, R., *How to manage plant design to obtain minimum cost*. *Chemical Engineering*, Vol. 84, No. 11, pp. 130-136, 1977a.

KERN, R., *Specifications are the key to successful plant design*. *Chemical Engineering*, Vol. 84, No. 14, pp. 123-129, 1977b.

KERN, R., *Layout arrangements for distillation columns*. *Chemical Engineering*, Vol. 84, No. 17, pp. 153-160, 1977c.

KERN, R., *How to find the optimum layout for heat exchangers*. *Chemical Engineering*, Vol. 84, No. 19, pp. 169-177, 1977d.

KERN, R., *Arrangements of process and storage vessels*. *Chemical Engineering*, Vol. 84, No. 24, pp. 93-99, 1977e.

KERN, R., *How to get the best process-plant layouts for pumps and compressors*. *Chemical Engineering*, Vol. 84, No. 26, pp. 131-140, 1977f.

KERN, R., *Piperack design for process plants*. *Chemical Engineering*, Vol. 85, No. 3, pp. 105-112, 1978a.

KERN, R., *Space requirements and layout for process furnaces*. *Chemical Engineering*, Vol. 85, No. 5, pp. 117-122, 1978b.

KERN, R., *Instrument arrangements for ease of maintenance and convenient operation*. *Chemical Engineering*, Vol. 85, No. 9, pp. 127-134, 1978c.

KERN, R., *How to arrange the plot plan for process plant*. *Chemical Engineering*, Vol. 85, No. 11, pp. 191-197, 1978d.

KERN, R., *Arranging the housed chemical process plant*. *Chemical Engineering*, Vol. 85, No. 16, pp. 123-130, 1978e.

KERN, R., *Controlling the cost factors in plant design*. *Chemical Engineering*, Vol. 85, No. 18, pp. 141-146, 1978f.

KOOPMANS, T.C.; BECKMAN, M., *Assignment problems and the location of economic activities*. *Econometrica*, v. 25, n° 53, pp. 53-76, 1957.

KUSIAK, A. A. e HERAGU, S. S., The facility layout problem, *European Journal of Operational Research*. Vol. 29, pp. 229 - 251, 1987.

LAWLER, E., *The Quadratic Assignment Problem*. Management Science, 9, pp. 586-599, 1963.

LORENZONI, L.; AHONEN, H.; ALVARENGA, A., *Colônia de formigas para problemas de escalonamento com restrição de recursos*. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 33, 2001, São Paulo. Anais. São Paulo: DIMAP, 2001.

LOVE, R.F.; MORRIS, J.G.; WESOLOWSKY, G.O., *Facilities location – Models and Methods*. Elsevier Science Publishing Co., North Holland, New York, 1988.

MALMBORG, C. J., *Heuristic, storage space minimization methods for facility layouts served by looped AGV systems*. International Journal of Production Research. Vol. 32, No. 11, 2695 - 2710, 1994.

MALAKOOTI, B., *Multiple objective facility layout: a heuristic to generate efficient alternatives*. Int. J. Prod. Res., v. 27, nº 7, 1225-1238, 1989.

MARTINS, V. C.; COELHO, L.S.; CÂNDIDO, M.A.B.; PACHECO, R.F., *Otimização de layouts industriais com base em busca tabu*. Gestão & Produção. V.10, nº1, 69-88, 2003.

MECKLENBURGH, J.C., *Process Plant Layout*. Halsted Press - John Wiley & Sons, New York, 1985.

MELLER, R. D.; GAU, K. Y., *The facility layout recent and emerging trends and perspectives*. Journal of Manufacturing Systems, v. 15, n. 5, p. 351-366, 1996.

MIRCHANDANI, P.B.; FRANCIS, R.L., *Discrete Location Theory*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1990.

NEWELL, R.G., *Algorithms for the Design of Chemical Plant Layout and Pipe Routing*. Ph.D. dissertation, Imperial College, London, England, 1973.

NUGENT, C. E., VOLLMANN, T. E. e RUML, J., *An experimental Comparison of Techniques for the Assignment of Facilities to Locations*, Operations Research, Vol. 16, p. 150 - 173, 1968.

ÖZYURT, D.B., & REALFF, M.J., *Geographic and process information for chemical plant layout problems*. *AIChE Journal*, Vol. 45, No. 10, pp. 2161-2174, 1999.

PAPADIMITRIOU, C.H.; STEIGLITZ, K. *Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity*. USA, Dover Publications Inc., 1982.

PAPAGEORGIOU, L.G., & ROTSTEIN, G.E., *Continuous-domain mathematical models for optimal process plant layout*. *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 37, pp. 3631-3639, 1998.

PATSIATZIS, D.I., & PAPAGEORGIOU, L.G., *Optimal multi-floor process plant layout*. *Computers Chem. Engng*, Vol. 26, No. 4/5, pp. 575-583, 2002.

PATSIATZIS, D.I., & PAPAGEORGIOU, L.G., *Efficient solution approaches for the multifloor process plant layout problem*, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 42, No. 4, pp. 811-824, 2003.

PENTEADO, F.D., & CIRIC, A.R., *An minlp approach for safe process plant layout*. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 35, pp. 1354-1361, 1996.

PEREIRA, E.M.K.A.; KLIPPEL, E.M.; FRAGA JUNIOR, L.C., *Um Tratamento para o Problema de Alocação de Disciplinas às Salas de Aulas Utilizando a Meta-Heurística Colônia de Formigas*. *Revista do Centro Universitário de Vila Velha*, v. 4, nº ½, 2003.

PETERS, M.M., & TIMMERHAUS, K.D., *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. 4th Edition, McGraw-Hill Inc., New York, 1991.

PISSINATTO, L. B., *Otimização do Posicionamento de Componentes no Layout de Plantas Químicas*. Dissertação de Mestrado, Campinas – SP, 2001.

PISSINATTO, L.B., & GUIRARDELLO, R., *Optimisation of the placement of the components in the layout of chemical plants. Proceedings of the 5th Italian Conference on Chemical and Process Engineering*, Florence – Italy, 20-23 May, 2001, Vol. 1, 471 – 476, 2001a.

PISSINATTO, L.B., & GUIRARDELLO, R., *Optimisation of the placement of the components in the layout of chemical plants. Proceedings of the 6th World Congress of Chemical Engineering*, Melbourne – Australia, 23-27 September, 2001, paper n. 661, 7 pages, 2001b.

PRATSCHKE, Anja; PELIZZONI, Jorge Marques. *Introdução à Inteligência Artificial – Projeto II*.

RAOOT, A. D. e RAKSHIT, A., *A ‘fuzzy’ heuristic for the quadratic assignment formulation to the facility layout proble*. *Internacional Journal of Production Research*. Vol. 23, No. 3, pp. 563 - 581, 1994.

REALFF, M.J., SHAH, N., & PANTELIDES, C.C., *Simultaneous design, layout and scheduling of pipeless batch plants. Computers Chem. Engng*, Vol. 20, No. 6/7, pp. 869-883, 1996.

ROSENBLATT, M.J. e LEE, H. L., *A robustness approach to facilities design*, *International Journal of Production Research*. Vol. 25, No. 4, 479 - 486, 1987.

SAHNI, S., GONZALES, T., *P-complete approximation problems*. *Journal of ACM*, v.23, pp. 555-565, 1976.

SAVSAR, M., *Flexible facility layout by simulation*, *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 20, No. 1, pp. 155 - 165, 1991.

SIRINAOVAKUL, B. e THAJCHAYAPONG, P., *A knowledge base to assist a heuristic search approach to facility layout*, *International Journal of Production Research*. Vol. 32, No. 1, pp. 141 - 160, 1994.

SOUZA, F.A.F., *Elaboração de um modelo de localização de cargas unitizadas agorindustriais em pátios portuários: aplicação ao caso do terminal portuário do Pecém.*

Dissertação de mestrado em Engenharia de Transporte. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza – Brasil, 2002.

SUCUPIRA, Igor R., *Programação por Propagação de Restrições: Teoria e Aplicações.*

Relatório final de iniciação científica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2004.

SUZUKI, A., FUCHINO, T., MURAKI, M., & HAYAKAWA, T., **An evolutionary method of arranging the plot plan for process plant layout**, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. **24**, No. 2, pp. 226-231, 1991a.

SUZUKI, A., FUCHINO, T., & MURAKI, M., *Equipment arrangement for batch plants in multi-floor buildings with integer programming.* *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 24, No. 6, pp. 737-742, 1991b.

TAM, K.Y. *A simulated annealing algorithm for allocating space to manufacturing cells.* *International Journal of Production Research*. nº1, pp. 63-87, 1992a.

TAM, K.Y. *Genetic algorithms, function optimization, and facility layout design.* *European Journal of Operational Research*, v.63, pp.322-346, 1992b.

TAM, K. Y.; LI, S.G., *A hierarchical approach to the facility layout problem.* *International journal of Production Research*, v.29, pp. 165-184, 1991.

TATE, D.; SMITH, A., *A genetic approach to the quadratic assignment problem.* *Computers and Operations Research*, 22, pp. 73-83, 1995.

VOLLMANN, T.E.; BUFFA, E. S., *Facilities layout problem in perspective.* *Management Science*, v.12, pp. 450-468, 1966.

Referências Bibliográficas

WALLACE, M., *Survey: Practical Applications of Constraint Programming*. In Constraints Journal, v. 1, nº 1, 1996.

WATSON, H.J.; BLACKSTONE JR., J.H., *Computer Simulation*. 2nd ed., John Wiley & Sons, 1989.

WELGAMA, P. S. e GIBSON, P. R., *An integrated methodology for automating the determination of layout and materials handling system*, International Journal of Production Research. Vol. 34, No. 8, 2247 - 2264, 1996.

WESTERLUND, J., PAPAGEORGIOU, L.G., WESTERLUND, T., *A problem formulation for optimal N-dimensional allocation*, Chemical Engineering Transactions Vol. 6, Proceedings of the 7th Italian Conference on Chemical & Process Engineering – ICheaP7, Vol. 1, pp. 185-190, 2005.

Referência Bibliográfica (Internet)

Arranjo físico:

<http://www.eps.ufsc.br/teses98/ivanqui/cap2.html>

Eduardo Banzato, Gerente da IMAM Consultoria Ltda., de São Paulo:

<http://www.guiadelogistica.com.br/ARTIGO217.htm>

(Marcio Nunes de Miranda – Algoritmos Genéticos: Fundamentos e Aplicações):

<http://www.gta.ufrj.br/~marcio/genetic.html>

Layout industrial:

<http://members.fortunecity.com/perin1/layind.html>

Referências Bibliográficas

Otimização Combinatória:

http://pt.wikipedia.org/wiki/Otimiza%C3%A7%C3%A3o_combinat%C3%B3ria

Otimização Combinatória – Aplicações e Técnicas:

<http://www.de.ufpb.br/~elder/oc-motivacao.html>

Otimização – Heurística – Programação Linear e Inteira – Programação por restrições:

<http://www.ilab.com.br/tecnologia.htm>

Poliéster – Oxiteno:

<http://www.oxiteno.com.br/aplicacoes/mercados/mercado.asp?idioma=PO&segmento=3315>

Poliéster – Relatórios – Rhodia:

http://www.infoinvest.com.br/modulos/arquivo_IAN.asp?arquivo=01455020.WAN&codevm=014559&language=ptb

Poliéster – Química Verde:

<http://academic.scranton.edu/faculty/CANNM1/industrialchemistry/industrialchemistrymoduleport.html>

Otimização de layouts industriais com base em busca tabu:

http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-530X2003000100006&script=sci_arttext

<http://members.fortunecity.com/perin1/layind.html>

<http://www.eps.ufsc.br/teses98/ivanqui/cap2.html>

http://www.icmc.sc.usp.br/~sandra/G9_t2/annealing.htm

ANEXO 1

Descrição dos equipamentos e dos custos unitários de tubulação e bombeamento

Tabela 1: Descrição dos Equipamentos do processo.

Nº do equipamentos	Equipamentos	Descrição	Altura (m)	Área (m²)
1	Aquecedor de etilenoglicol (EG)	V 11.1	1,80	0,93
2	Aquecedor de etilenoglicol (EG)	V 11.2	1,80	0,93
3	Vaso de Preparação do Cat A	V 21.1	0,60	0,24
4	Vaso de Preparação do Cat A	V 21.2	0,60	0,24
5	Vaso de preparação do DMT	V 31.1	1,80	0,93
6	Vaso de preparação do DMT	V 31.2	1,80	0,93
7	Vaso para Medida de DMT	V 40	1,44	0,53
8	Tq para preparação de TiO ₂	V 51.1	1,32	0,53
9	Tq para preparação de TiO ₂	V 51.2	1,32	0,53
10	Tq para preparação de TiO ₂	V 51.3	1,32	0,53
11	Tq de estocagem do Cat. B	V 60	1,68	0,53
12	Reator de Esterificação	ER 71.1	2,16	1,19
13	Reator de Esterificação	ER 71.2	2,16	1,19
14	Reator de Esterificação	ER 71.3	2,16	1,19
15	Reator de Esterificação	ER 71.4	2,16	1,19
16	Reator de policondensação	PR 81.1	1,92	1,45
17	Reator de policondensação	PR 81.2	1,92	1,45
18	Reator de policondensação	PR 81.3	1,92	1,45
19	Reator de policondensação	PR 81.4	1,92	1,45
20	Coletor para etilenoglicol (EG) e água	V71.1	1,56	0,29
21	Coletor para etilenoglicol (EG) e água	V71.2	1,56	0,29

ANEXO 1

Nº do equipamentos	Equipamentos	Descrição	Altura (m)	Área (m²)
22	Coletor para etilenoglicol (EG) e água	V71.3	1,56	0,29
23	Coletor para etilenoglicol (EG) e água	V71.4	1,56	0,29
24	Condensador do Etilenoglicol e Metanol	E 81.1	1,80	0,24
25	Condensador do Etilenoglicol e Metanol	E 81.2	1,80	0,24
26	Condensador do Etilenoglicol e Metanol	E 81.3	1,80	0,24
27	Condensador do Etilenoglicol e Metanol	E 81.4	1,80	0,40
28	Coletor para Etilenoglicol (EG) e Metanol	V 811.1	1,56	0,36
29	Coletor para Etilenoglicol (EG) e Metanol	V 811.2	1,56	0,36
30	Coletor para Etilenoglicol (EG) e Metanol	V 811.3	1,56	0,36
31	Coletor para Etilenoglicol (EG) e Metanol	V 811.4	1,56	0,36
32	Refrigerador	Z 811.1	0,36	4,00
33	Refrigerador	Z 811.2	0,36	4,00
34	Refrigerador	Z 811.3	0,36	4,00
35	Refrigerador	Z 811.4	0,36	4,00
36	Vaso para a coleta de chips	V 821.1	1,56	0,53
37	Vaso para a coleta de chips	V 821.2	1,56	0,53
38	Vaso para a coleta de chips	V 821.3	1,56	0,53
39	Vaso para a coleta de chips	V 821.4	1,56	0,53
40	Vaso para a mistura fria	V 90	2,16	1,61

ANEXO 1

Nº do equipamento	Equipamentos	Descrição	Altura (m)	Área (m²)
41	Tq para armazenamento do condensador	V 100	1,8	1,19
42	Tq de água	V 111	1,68	1,19
43	Slicer-dicer	Z 821.1	0,96	0,60
44	Slicer-dicer	Z 821.2	0,96	0,60
45	Slicer-dicer	Z 821.3	0,96	0,60
46	Slicer-dicer	Z 821.4	0,96	0,60
47	Condensador do Etilenoglicol e Metanol	E 71.1	1,8	0,24
48	Condensador do Etilenoglicol e Metanol	E 71.2	1,8	0,24
49	Condensador do Etilenoglicol e Metanol	E 71.3	1,8	0,24
50	Condensador do Etilenoglicol e Metanol	E 71.4	1,8	0,24

Distância de segurança dos equipamentos:

Reatores 10m e demais equipamentos 5m.

Tabela 2: Custos unitários de tubulações entre pares de equipamentos.

Equipamentos conectados	Conectados (Equipamentos - nós)	Material	Diâmetro	Vazão	Custo (Tubos) (US\$/ft)
1 – 41	1.1 - 15	Aço Carbono	4	1,70	37,32
2 – 41	1.2 - 15	Aço Carbono	4	1,70	37,32
1 – 3	1.1 - 2.1	Aço Inox	2	0,57	66,84
2 – 4	1.2 - 2.2	Aço Inox	2	0,57	66,84
1 – 51	1.1 - nó 1	Aço Inox	2	3,40	66,84
2 – 51	1.2 - nó 1	Aço Inox	2	3,40	66,84
51 – 52	nó 1 - nó 2	Aço Inox	3	6,80	98,29
52 – 12	nó 2 - 7.1	Aço Inox	3	1,70	98,29
52 – 13	nó 2 - 7.2	Aço Inox	3	1,70	98,29
52 – 14	nó 2 - 7.3	Aço Inox	3	1,70	98,29
52 – 15	nó 2 - 7.4	Aço Inox	3	1,70	98,29
3 – 51	2.1 - nó 3	Aço Inox	2	0,57	66,84
4 – 51	2.2 - nó 3	Aço Inox	2	0,57	66,84
-	nó 3 - nó 4	Aço Inox	2	1,14	66,84
51 – 12	nó 4 - 7.1	Aço Inox	2	0,29	66,84
51 – 13	nó 4 - 7.2	Aço Inox	2	0,29	66,84
51 – 14	nó 4 - 7.3	Aço Inox	2	0,29	66,84
51 – 15	nó 4 - 7.4	Aço Inox	2	0,29	66,84
5 – 53	3.1 - nó 5	Aço Inox	4	3,40	129,75
6 – 53	3.2 - nó 5	Aço Inox	4	3,40	129,75
53 - 54	nó 5 - nó 6	Aço Inox	2	6,80	66,84

ANEXO 1

Equipamentos conectados	Conectados (Equipamentos - nós)	Material	Diâmetro	Vazão	Custo (Tubos) (US\$/ft)
54 – 12	nó 6 - 7.1	Aço Inox	3	1,70	98,29
54 – 13	nó 6 - 7.2	Aço Inox	3	1,70	98,29
54 – 14	nó 6 - 7.3	Aço Inox	3	1,70	98,29
54 – 15	nó 6 - 7.4	Aço Inox	3	1,70	98,29
5 – 41	3.1 - 15	Aço Carbono	4	1,70	37,32
6 – 41	3.2 - 15	Aço Carbono	4	1,70	37,32
7 – 55	4 - nó 7	Aço Inox	2	1,13	66,84
55 – 8	nó 7 - 5.1	Aço Inox	2	0,38	66,84
55 – 9	nó 7 - 5.2	Aço Inox	2	0,38	66,84
55 – 10	nó 7 - 5.3	Aço Inox	2	0,38	66,84
8 – 56	5.1 - nó 8	Aço Inox	2	1,70	66,84
9 – 56	5.2 - nó 8	Aço Inox	2	1,70	66,84
10 – 56	5.3 - nó 8	Aço Inox	2	1,70	66,84
56 – 57	nó 8 - nó 9	Aço Inox	2	5,10	66,84
57 – 16	nó 9 - 8.1	Aço Inox	2	1,28	66,84
57 – 17	nó 9 - 8.2	Aço Inox	2	1,28	66,84
57 – 18	nó 9 - 8.3	Aço Inox	2	1,28	66,84
57 – 19	nó 9 - 8.4	Aço Inox	2	1,28	66,84
11 – 58	6 - nó 10	Aço Inox	2	1,13	66,84
58 – 16	nó 10 - 8.1	Aço Inox	2	0,28	66,84
58 – 17	nó 10 - 8.2	Aço Inox	2	0,28	66,84
58 – 18	nó 10 - 8.3	Aço Inox	2	0,28	66,84

ANEXO 1

Equipamentos conectados	Conectados (Equipamentos - nós)	Material	Diâmetro	Vazão	Custo (Tubos) (US\$/ft)
58 – 19	nó 10 - 8.4	Aço Inox	2	0,28	66,84
12 – 59	7.1 - nó 11	Aço Carbono	2	2,29	19,22
13 – 59	7.2 - nó 11	Aço Carbono	2	2,29	19,22
14 – 59	7.3 - nó 11	Aço Carbono	2	2,29	19,22
15 – 59	7.4 - nó 11	Aço Carbono	2	2,29	19,22
59 – 41	nó 11 - 15	Aço Carbono	4	9,16	37,32
12 – 47	7.1 - 18.1	Aço Carbono	2	2,29	19,22
13 – 48	7.2 - 18.2	Aço Carbono	2	2,29	19,22
14 – 49	7.3 - 18.3	Aço Carbono	2	2,29	19,22
15 – 50	7.4 - 18.4	Aço Carbono	2	2,29	19,22
12 – 16	7.1 - 8.1	Aço Inox	4	4,60	129,75
13 – 17	7.2 - 8.2	Aço Inox	4	4,60	129,75
14 – 18	7.3 - 8.3	Aço Inox	4	4,60	129,75
15 – 19	7.4 - 8.4	Aço Inox	4	4,60	129,75
16 – 24	8.1 - 10.1	Aço Carbono	2	2,29	19,22
17 – 25	8.2 - 10.2	Aço Carbono	2	2,29	19,22
18 – 26	8.3 - 10.3	Aço Carbono	2	2,29	19,22
19 – 27	8.4 - 10.4	Aço Carbono	2	2,29	19,22
16 – 32	8.1 - 12.1	Aço Inox	4	3,40	129,75
17 – 33	8.2 - 12.2	Aço Inox	4	3,40	129,75
18 – 34	8.3 - 12.3	Aço Inox	4	3,40	129,75
19 – 35	8.4 - 12.4	Aço Inox	4	3,40	129,75

ANEXO 1

Equipamentos conectados	Conectados (Equipamentos - nós)	Material	Diâmetro	Vazão	Custo (Tubos) (US\$/ft)
20 – 47	9.1 - 18.1	Aço Carbono	2	2,29	19,22
21 – 48	9.2 - 18.2	Aço Carbono	2	2,29	19,22
22 – 49	9.3 - 18.3	Aço Carbono	2	2,29	19,22
23 – 50	9.4 - 18.4	Aço Carbono	2	2,29	19,22
20 – 60	9.1 - nó 12	Aço Carbono	2	2,29	19,22
21 – 60	9.2 - nó 12	Aço Carbono	2	2,29	19,22
22 – 60	9.3 - nó 12	Aço Carbono	2	2,29	19,22
23 – 60	9.4 - nó 12	Aço Carbono	2	2,29	19,22
60 – 40	nó 12 - 14	Aço Carbono	4	9,16	37,32
24 – 29	10.1 - 11.1	Aço Carbono	2	2,29	19,22
25 – 30	10.2 - 11.2	Aço Carbono	2	2,29	19,22
26 – 31	10.3 - 11.3	Aço Carbono	2	2,29	19,22
27 – 32	10.4 - 11.4	Aço Carbono	2	2,29	19,22
29 – 61	11.1 - nó 13	Aço Carbono	2	3,40	19,22
30 – 61	11.2 - nó 13	Aço Carbono	2	3,40	19,22
31 – 61	11.3 - nó 13	Aço Carbono	2	3,40	19,22
32 – 61	11.4 - nó 13	Aço Carbono	2	3,40	19,22
61 – 40	nó 13 - 14	Aço Carbono	4	13,60	37,32
32 – 37	12.1 - 17.1	Aço Inox	4	3,40	129,75
33 – 38	12.2 - 17.2	Aço Inox	4	3,40	129,75
34 – 39	12.3 - 17.3	Aço Inox	4	3,40	129,75
35 – 40	12.4 - 17.4	Aço Inox	4	3,40	129,75

ANEXO 1

Equipamentos conectados	Conectados (Equipamentos - nós)	Material	Diâmetro	Vazão	Custo (Tubos) (US\$/ft)
32 – 62	12.1 - nó 14	Aço Inox	2	3,40	66,84
33 – 62	12.2 - nó 14	Aço Inox	2	3,40	66,84
34 – 62	12.3 - nó 14	Aço Inox	2	3,40	66,84
35 – 62	12.4 - nó 14	Aço Inox	2	3,40	66,84
62 – 42	nó 14 - 16	Aço Inox	4	13,60	129,75
37 – 43	13.1 - 17.1	Aço Inox	4	3,40	129,75
38 – 44	13.2 - 17.2	Aço Inox	4	3,40	129,75
39 – 45	13.3 - 17.3	Aço Inox	4	3,40	129,75
40 – 46	13.4 - 17.4	Aço Inox	4	3,40	129,75

Tabela 3: Custos unitários de bombeamento entre pares de equipamentos.

Equipamentos	Conectados (equipamentos e nós)	Vazão	W/h	Kw/h	Custo de bombeamento(US\$/ft)
1 – 41	1.1 - 15	1,70	2,833	0,0028	1,50
2 – 41	1.2 - 15	1,70	2,833	0,0028	1,50
1 – 3	1.1 - 2.1	0,57	0,950	0,0010	0,50
2 – 4	1.2 - 2.2	0,57	0,950	0,0010	0,50
1 – 51	1.1 - nó 1	3,40	5,667	0,0057	2,99
2 – 51	1.2 - nó 1	3,40	5,667	0,0057	2,99
51 – 52	nó 1 - nó 2	6,80	11,333	0,0113	5,98
52 – 12	nó 2 - 7.1	1,70	2,833	0,0028	1,50
52 – 13	nó 2 - 7.2	1,70	2,833	0,0028	1,50
52 – 14	nó 2 - 7.3	1,70	2,833	0,0028	1,50
52 – 15	nó 2 - 7.4	1,70	2,833	0,0028	1,50
3 – 51	2.1 - nó 3	0,57	0,950	0,0010	0,50
4 – 51	2.2 - nó 3	0,57	0,950	0,0010	0,50
-	nó 3 - nó 4	1,14	1,900	0,0019	1,00
51 – 12	nó 4 - 7.1	0,29	0,475	0,0005	0,25
51 – 13	nó 4 - 7.2	0,29	0,475	0,0005	0,25
51 – 14	nó 4 - 7.3	0,29	0,475	0,0005	0,25
51 – 15	nó 4 - 7.4	0,29	0,475	0,0005	0,25
5 – 53	3.1 - nó 5	3,40	5,667	0,0057	2,99
6 – 53	3.2 - nó 5	3,40	5,667	0,0057	2,99
53 - 54	nó 5 - nó 6	6,80	11,333	0,0113	5,98

Equipamentos	Conectados (equipamentos e nós)	Vazão	W/h	Kw/h	Custo de bombeamento(US\$/ft)
54 – 12	nó 6 - 7.1	1,70	2,833	0,0028	1,50
54 – 13	nó 6 - 7.2	1,70	2,833	0,0028	1,50
54 – 14	nó 6 - 7.3	1,70	2,833	0,0028	1,50
54 – 15	nó 6 - 7.4	1,70	2,833	0,0028	1,50
5 – 41	3.1 - 15	1,70	2,833	0,0028	1,50
6 – 41	3.2 - 15	1,70	2,833	0,0028	1,50
7 – 55	4 - nó 7	1,13	1,883	0,0019	0,99
55 – 8	nó 7 - 5.1	0,38	0,628	0,0006	0,33
55 – 9	nó 7 - 5.2	0,38	0,628	0,0006	0,33
55 – 10	nó 7 - 5.3	0,38	0,628	0,0006	0,33
8 – 56	5.1 - nó 8	1,70	2,833	0,0028	1,50
9 – 56	5.2 - nó 8	1,70	2,833	0,0028	1,50
10 – 56	5.3 - nó 8	1,70	2,833	0,0028	1,50
56 – 57	nó 8 - nó 9	5,10	8,500	0,0085	4,49
57 – 16	nó 9 - 8.1	1,28	2,125	0,0021	1,12
57 – 17	nó 9 - 8.2	1,28	2,125	0,0021	1,12
57 – 18	nó 9 - 8.3	1,28	2,125	0,0021	1,12
57 – 19	nó 9 - 8.4	1,28	2,125	0,0021	1,12
11 – 58	6 - nó 10	1,13	1,883	0,0019	0,99
58 – 16	nó 10 - 8.1	0,28	0,471	0,0005	0,25
58 – 17	nó 10 - 8.2	0,28	0,471	0,0005	0,25
58 – 18	nó 10 - 8.3	0,28	0,471	0,0005	0,25

Equipamentos	Conectados (equipamentos e nós)	Vazão	W/h	Kw/h	Custo de bombeamento(US\$/ft)
58 – 19	nó 10 - 8.4	0,28	0,471	0,0005	0,25
12 – 59	7.1 - nó 11	2,29	3,817	0,0038	2,01
13 – 59	7.2 - nó 11	2,29	3,817	0,0038	2,01
14 – 59	7.3 - nó 11	2,29	3,817	0,0038	2,01
15 – 59	7.4 - nó 11	2,29	3,817	0,0038	2,01
59 – 41	nó 11 - 15	9,16	15,267	0,0153	8,06
12 – 47	7.1 - 18.1	2,29	3,817	0,0038	2,01
13 – 48	7.2 - 18.2	2,29	3,817	0,0038	2,01
14 – 49	7.3 - 18.3	2,29	3,817	0,0038	2,01
15 – 50	7.4 - 18.4	2,29	3,817	0,0038	2,01
12 – 16	7.1 - 8.1	4,60	7,667	0,0077	4,05
13 – 17	7.2 - 8.2	4,60	7,667	0,0077	4,05
14 – 18	7.3 - 8.3	4,60	7,667	0,0077	4,05
15 – 19	7.4 - 8.4	4,60	7,667	0,0077	4,05
16 – 24	8.1 - 10.1	2,29	3,817	0,0038	2,01
17 – 25	8.2 - 10.2	2,29	3,817	0,0038	2,01
18 – 26	8.3 - 10.3	2,29	3,817	0,0038	2,01
19 – 27	8.4 - 10.4	2,29	3,817	0,0038	2,01
16 – 32	8.1 - 12.1	3,40	5,667	0,0057	2,99
17 – 33	8.2 - 12.2	3,40	5,667	0,0057	2,99
18 – 34	8.3 - 12.3	3,40	5,667	0,0057	2,99
19 – 35	8.4 - 12.4	3,40	5,667	0,0057	2,99

ANEXO 1

Equipamentos	Conectados (equipamentos e nós)	Vazão	W/h	Kw/h	Custo de bombeamento(US\$/ft)
20 – 47	9.1 - 18.1	2,29	3,817	0,0038	2,01
21 – 48	9.2 - 18.2	2,29	3,817	0,0038	2,01
22 – 49	9.3 - 18.3	2,29	3,817	0,0038	2,01
23 – 50	9.4 - 18.4	2,29	3,817	0,0038	2,01
20 – 60	9.1 - nó 12	2,29	3,817	0,0038	2,01
21 – 60	9.2 - nó 12	2,29	3,817	0,0038	2,01
22 – 60	9.3 - nó 12	2,29	3,817	0,0038	2,01
23 – 60	9.4 - nó 12	2,29	3,817	0,0038	2,01
60 – 40	nó 12 - 14	9,16	15,267	0,0153	8,06
24 – 29	10.1 - 11.1	2,29	3,817	0,0038	2,01
25 – 30	10.2 - 11.2	2,29	3,817	0,0038	2,01
26 – 31	10.3 - 11.3	2,29	3,817	0,0038	2,01
27 – 32	10.4 - 11.4	2,29	3,817	0,0038	2,01
29 – 61	11.1 - nó 13	3,40	5,667	0,0057	2,99
30 – 61	11.2 - nó 13	3,40	5,667	0,0057	2,99
31 – 61	11.3 - nó 13	3,40	5,667	0,0057	2,99
32 – 61	11.4 - nó 13	3,40	5,667	0,0057	2,99
61 – 40	nó 13 - 14	13,60	22,667	0,0227	11,96
32 – 37	12.1 - 17.1	3,40	5,667	0,0057	2,99
33 – 38	12.2 - 17.2	3,40	5,667	0,0057	2,99
34 – 39	12.3 - 17.3	3,40	5,667	0,0057	2,99
35 – 40	12.4 - 17.4	3,40	5,667	0,0057	2,99

ANEXO 1

Equipamentos	Conectados (equipamentos e nós)	Vazão	W/h	Kw/h	Custo de bombeamento(US\$/ft)
32 – 62	12.1 - nó 14	3,40	5,667	0,0057	2,99
33 – 62	12.2 - nó 14	3,40	5,667	0,0057	2,99
34 – 62	12.3 - nó 14	3,40	5,667	0,0057	2,99
35 – 62	12.4 - nó 14	3,40	5,667	0,0057	2,99
62 – 42	nó 14 - 16	13,60	22,667	0,0227	11,96
37 – 43	13.1 - 17.1	3,40	5,667	0,0057	2,99
38 – 44	13.2 - 17.2	3,40	5,667	0,0057	2,99
39 – 45	13.3 - 17.3	3,40	5,667	0,0057	2,99
40 – 46	13.4 - 17.4	3,40	5,667	0,0057	2,99

Tabela 4: Custos unitários de tubulação em relação à alimentação.

Equipamentos	Alimentação	Material	Diâmetro	Vazão(kg/s)	Equipamento	Custo do tubo(US\$/ft)
3	Catalisador A	Aço Inox	2	1,13	2	66,839
4	Catalisador A	Aço Inox	"	"	2	"
12	Catalisador B	Aço Inox	2	1,13	7	66,839
13	Catalisador B	Aço Inox	"	"	7	"
14	Catalisador B	Aço Inox	"	"	7	"
15	Catalisador B	Aço Inox	2	1,13	7	66,839
11	Catalisador C	Aço Inox	2	1,13	6	66,839
8	TiO ₂	Aço Carb	2	0,57	5	19,220
9	TiO ₂	Aço Carb	"	"	5	"
10	TiO ₂	Aço Carb	2	0,57	5	19,220
20	Água	Aço Carb	2	2,29	9	19,220
21	Água	Aço Carb	"	"	9	"
22	Água	Aço Carb	"	"	9	"
23	Água	Aço Carb	2	2,29	9	19,220
24	Água	Aço Carb	2	2,29	10	19,220
25	Água	Aço Carb	"	"	10	"
26	Água	Aço Carb	"	"	10	"
27	Água	Aço Carb	2	2,29	10	19,220
42	Água	Aço Carb	2	2,29	16	19,220
5	Teraftalato de dimetila	Aço Inox	4	4,6	3	129,750

ANEXO 1

Equipamentos	Alimentação	Material	Diâmetro	Vazão(kg/s)	Equipamento	Custo do tubo(US\$/ft)
6	Teraftalato de dimetila	Aço Inox	"	4,6	3	129,750
5	Nitrogênio	Aço Carb	2	0,57	3	19,220
6	Nitrogênio	Aço Carb	2	"	3	"
1	Nitrogênio	Aço Carb	2	0,57	1	19,220
2	Nitrogênio	Aço Carb	2	0,57	1	19,220
12	Nitrogênio	Aço Carb	2	0,57	7	19,220
13	Nitrogênio	Aço Carb	"		7	
14	Nitrogênio	Aço Carb	"		7	
15	Nitrogênio	Aço Carb	2	0,57	7	19,220
16	Nitrogênio	Aço Carb	2	0,57	8	19,220
17	Nitrogênio	Aço Carb	2	"	8	"
18	Nitrogênio	Aço Carb	2	"	8	"
19	Nitrogênio	Aço Carb	2	0,57	8	19,220
42	Etilenoglicol	Aço Inox	4	4,6	16	129,750

Tabela 5: Custos unitários de tubulação e de bombeamento em relação à saída.

Nº correspondente ao equipamentos	Saída	Material	Diâmetro	Vazão(kg/s)	Equipamentos	Custo do tubo(US\$/ft)
36	Poliéster	Aço Inox	4	4,6	13	129,750
37	Poliéster	Aço Inox	"	4,6	13	"
38	Poliéster	Aço Inox	"	4,6	13	"
39	Poliéster	Aço Inox	4	4,6	13	129,750
40	Metanol	Aço Carb	2	2,29	16	19,220
41	Mistura	Aço Carb	2	2,29	15	19,220
12	Mistura	Aço Carb	2	2,29	7	19,220
13	Mistura	Aço Carb	"	"	7	"
14	Mistura	Aço Carb	"	"	7	"
15	Mistura	Aço Carb	2	2,29	7	19,220
16	Mistura	Aço Carb	2	2,29	8	19,220
17	Mistura	Aço Carb	"	"	8	"
18	Mistura	Aço Carb	"	"	8	"
19	Mistura	Aço Carb	2	2,29	8	19,220
24	Água	Aço Carb	2	2,29	10	19,220
25	Água	Aço Carb	"	"	10	"
26	Água	Aço Carb	"	"	10	"
27	Água	Aço Carb	2	2,29	10	19,220
47	Água	Aço Carb	2	2,29	18	19,220
48	Água	Aço Carb	"	"	18	"

ANEXO 1

Nº correspondente ao equipamentos	Saída	Material	Diâmetro	Vazão(kg/s)	Equipamento	Custo do tubo(US\$/ft)
49	Água	Aço Carb	"	"	18	"
50	Água	Aço Carb	2	2,29	18	19,220

ANEXO 2

Gráficos e Tabelas para o Cálculo dos
Custos Unitários da tubulação (GUTHRIE, 1974).

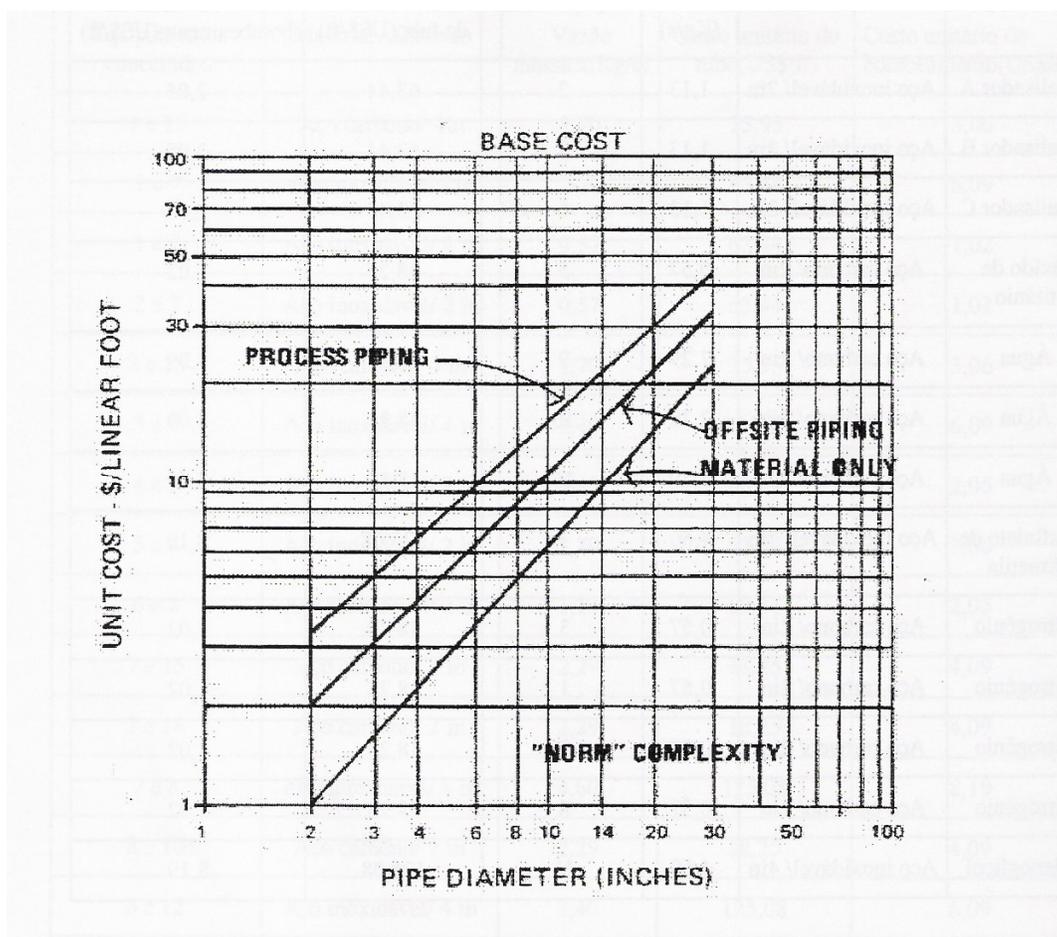


Figura 1: Custo base em função do diâmetro da tubulação.

Fatores de Ajustes:

Tabela 1: Fatores de ajuste F_c .

Complexidade do circuito	F_c
Apertado	1.08
Normal	1.00
Relaxado	0.85

Tabela 2: Fatores de ajuste F_m .

Material	F_m
Aço Carbono	0.00
Cromo/Moly	1.58
Aço Inoxidável	3.22
Monel	3.45

Tabela 3: Fatores de ajuste F_t .

Parede	F_t
Schedule	0.00
Extra Strong	0.30
Double Extra Strong	1.19

Tabela 4: Fatores de ajuste F_p .

Pressão	F_p
150 lb	0.00
300 lb	0.59
600 lb	0.68

ANEXO 3

Gráfico para o Cálculo dos
Custos de Suportes de Aço (GUTHRIE, 1974).

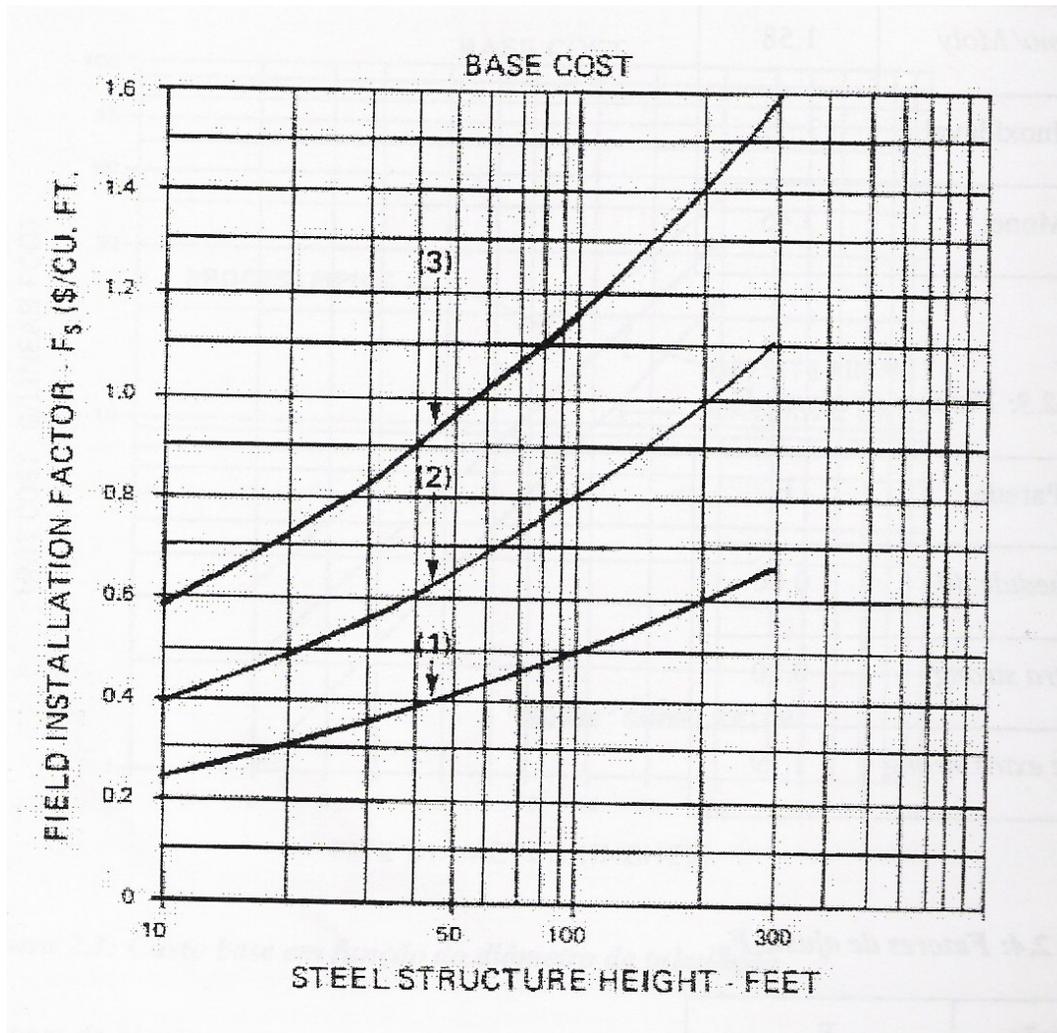


Figura 1: Fator de instalação em função da altura do suporte.

1. Construção Leve: Até 50 pés de altura, geralmente com acesso, áreas de plataforma, suporte e escadas.
2. Construção Média: Para estrutura de até 200 pés de altura, projetadas para equipamentos médios, com áreas de plataforma e escadas.
3. Construção Pesada: Estrutura acima de 300 pés, projetadas para suportes de equipamentos pesados, guindaste e algumas construções cobertas, elevador não incluído.

ANEXO 4

Programa em FORTRAN

PROGRAM AAS

*****PROGRAMA PRINCIPAL*****

DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS:

```
IMPLICIT REAL *8 (W,Z,B,S,X,Y,D,C,T,A,P,G)
DIMENSION LV(1000), LVO(1000), AREA(1000), LP(1000)
DIMENSION CSN1(1000,1000), DSN1(1000,1000), CPE(1000), CPS(1000)
DIMENSION CAV(1000,1000), XC(1000), YC(1000), ZC(1000)
DIMENSION B(1000,1000), DSV(1000,1000), DAV (1000,1000)
DIMENSION DAEC(1000,1000), DSS1(1000,1000)
DIMENSION CAP(1000,1000), CSP(1000,1000), CPVE(1000)
DIMENSION DSFP(1000,1000), CSF(1000,1000), CPVS(1000)
COMMON/AREA1/LV,LVO,LP
COMMON/AREA2/DSN1,DSV,DAV
COMMON/AREA3/DAEC,DSS1,DSFP
COMMON/AREA4/B,CSN1,CAV
COMMON/AREA5/CAP,CSP,CSF
COMMON/VALOR/N,NC,Z,W,CK,ZO,W1,W2,W3,W4,W5,W6
COMMON/MARK/M1,M2,M3
COMMON/RMARK/WM,ZM,SIGMA2,X
COMMON/DERIV/SC0,SC1,SC2,SC3,SC4,SC5,SZ1,SZ2,SZ3,DR
```

INICIALIZAÇÃO:

ARQUIVOS DE ENTRADA:

NC=62

NC= NÚMEROS DE ELEMENTOS

OBSERVAÇÃO: SÃO 50 ELEMENTOS (EQUIPAMENTOS REAIS)
SOMANDO MAIS 12 "ELEMENTOS" QUE SÃO OS NÓS (JUNÇÃO DOS
EQUIPAMENTOS).

N=125

N=NÚMERO DE POSIÇÕES

```
DO I=1,N
LP(I)=0
ENDDO
```

POSIÇÕES DA ENTRADA (PIPERACK DE ENTRADA)

PE=30
LP(30)=1

POSIÇÕES DA SAIDA (PIPERACK DE SAIDA)

PS=29
LP(29)=1

1- CALCULO DAS DISTANCIAS ENTRE AS POSIÇÕES

DO K1=1,4

DO K2=1,4

DO K3=1,4

L=(K1-1)+4*(K2-1)+16*(K3-1)+1

XC(L)=5.0D0/3.048D-1*DFLOAT(K1-1)

YC(L)=5.0D0/3.048D-1*DFLOAT(K2-1)

ZC(L)=5.0D0/3.048D-1*DFLOAT(K3-1)

ENDDO

ENDDO

ENDDO

DO K=1,N

DO L=1,N

CÁLCULO DA DISTÂNCIA DE UM ARCO

DARC=(5.0D0/3.048D-1)

A DISTÂNCIA ENTRE AS POSIÇÕES ESTÁ SENDO CÁLCULADO EM FT
(FEET)

DSN1(K,L)=(DABS(XC(K)-XC(L))+DABS(YC(K)-YC(L))+DABS(ZC(K)-
ZC(L)))

DSV(K,L)=(DABS(ZC(K)-ZC(L)))

ENDDO

ENDDO

CÁLCULO DA DISTÂNCIA ASSIMÉTRICA VERTICAL

DO K=1,N

DO L=1,N

IF (ZC(L).GE.ZC(K)) THEN

DAV(K,L)=0.D0

ENDIF
ENDDO
ENDDO

CÁLCULO DE DISTÂNCIA ASSIMÉTRICA DE EXCLUSÃO DE
CAMADAS(DAEC(K,L))

DO K=1,N
DO L=1,N

IF(ZC(L).GE.ZC(K)) THEN
DAEC(K,L)=1.D0
ELSE

DAEC(K,L)=0.D0
ENDIF
ENDDO
ENDDO

CÁLCULO DA DISTÂNCIA SIMÉTRICA DE SEGURANÇA NO MÍNIMO 2
ARCOS

DO K=1,N
DO L=1,N

DAUX=DABS(XC(K)-XC(L))+DABS(YC(K)-YC(L))+DABS(ZC(K)-ZC(L))
IF(DAUX.GT.(1.5D0*DARC)) THEN
DSS1(K,L)=0.D0
ELSE
DSS1(K,L)=1.D0
ENDIF
ENDDO
ENDDO

MATRIZ DISTÂNCIA DSFP

DO K=1,N
DO L=1,N

DAUX1=DABS(XC(K)-XC(L))
DAUX2=DABS(YC(K)-YC(L))
DAUX3=DABS(ZC(K)-ZC(L))

```
IF((DAUX3.LT.0.5D0*DARC).AND.((DAUX1+DAUX2).LT.1.5D0*DARC))
THEN
  DSFP(K,L)=0.D0

ELSE
  DSFP(K,L)=1.D0

ENDIF
ENDDO
ENDDO
```

2- ENTRADA DOS CUSTOS ENTRE EQUIPAMENTOS

(CSN1 DE DISTÂNCIA ENTRE OS EQUIPAMENTOS)

A-CUSTOS ENTRE EQUIPAMENTOS 'FANTASMAS'

```
DO I1=1,N
DO I2=1,N
CSN1(I1,I2)=0.D0
```

```
ENDDO
ENDDO
```

B-ENTRADA DOS CUSTOS UNITÁRIOS ENTRE EQUIPAMENTOS REAIS QUE POSSUEM CONEXÕES

```
DO I=1,NC
DO J=1,NC
CSN1(I,J)=0.D0
ENDDO
ENDDO
OPEN (UNIT=1, FILE='CT.DAT')
DO 25 L=1,95
READ (1,*) I,J,CSN1(I,J)
25 CONTINUE
CLOSE(1)

DO I=1,NC
DO J=1,NC

CSN1(K,J)=CSN1(I,J)/2.D0
ENDDO
ENDDO
```

3- ENTRADA DOS CUSTOS DE POSIÇÃO

(CUSTO DE POSIÇÃO É O CUSTO PARA SE INSTALAR UM
DETERMINADO EQUIPAMENTO NUMA CERTA POSIÇÃO)

TUBOS DE ENTRADA E SAÍDA

```
OPEN(UNIT=1, FILE='CPE.DAT')
DO 26 I=1,NC
READ(1,*)CPE(I)
26 CONTINUE
CLOSE(1)
```

```
OPEN(UNIT=1, FILE='CPVE.DAT')
DO 27 I=1, NC
READ(1,*)CPVE(I)
27 CONTINUE
CLOSE(1)
```

```
OPEN(UNIT=1, FILE='CPS.DAT')
DO 28 I=1, NC
READ(1,*)CPS(I)
28 CONTINUE
CLOSE(1)
```

```
OPEN(UNIT=1, FILE='CPVS.DAT')
DO 29 I=1, NC
READ(1,*)CPVS(I)
29 CONTINUE
CLOSE(1)
```

ABERTURA DE ARQUIVO DE ENTRADA DA AREA DE SECÇÃO
TRANSVERSAL DOS EQUIPAMENTOS (METROS)

```
OPEN (UNIT=2,FILE='AREA.DAT')
DO 30 I=1,NC
READ (2,*)AREA(I)
30 CONTINUE
40 FORMAT (18F7.4)
CLOSE(2)
```

OS EQUIPAMENTOS FANTASMAS NAO APRESENTAM AREA

```
DO I=NC+1,N
AREA(I)=0.D0
ENDDO
```

O CUSTO DE UMA ESTRUTURA DE CONCRETO PODE SER OBTIDO
PELAS TABELAS DO GUTRIE.

ASSIM:

CUSTO DA ESTRUTURA=(AREA X ALTURA)X FS X INDICE

SENDO QUE: FS=ALTURA**(0.3334)*0.1110

```

DO I=1,NC
DO K=1,N

B(I,K)=(1.0D0/(3.048D-1**2))*(AREA(I)*ZC(K))*(ZC(K)**
+3.334D-1)*1.110D-1*411.2D0/116.7D0
ENDDO
ENDDO

DO I=1,NC
DO K=1,N

B(I,K)=B(I,K)+CPE(I)*DSN1(K,PE)+CPS(I)*DSN1(K,PS)+
+CPVE(I)*DAV(PE,K)+CPVS(I)*DAV(K,PS)

ENDDO
ENDDO

DO I=NC+1,N
DO K=1,N
B(I,K)=0.D0
ENDDO
ENDDO

```

4- ENTRADA DOS CUSTOS VERTICAIS

```

DO I=1,NC
DO J=1,NC
CSN1(I,J)=0.D0
ENDDO
ENDDO
OPEN (UNIT=1, FILE='CB.DAT')

```

```
DO 50 L=1,95
READ (1,*) I,J,CSN1(I,J)
50 CONTINUE
CLOSE(1)
```

```
DO I=1,N
DO J=1,N
CAV(I,J)=0.D0
ENDDO
ENDDO
```

CUSTO DE PENALTY

CUSPEN=1.0D5

5- CUSTOS ASSIMETRICOS DE PENALTI ASSOCIADO A DAEC(K.L)

```
DO I=1,N
DO J=1,N
CAP(I,J)=0.D0
ENDDO
ENDDO
```

CUSTOS DE PENALTY

```
CAP(1,51)=CUSPEN
CAP(2,51)=CUSPEN
CAP(51,52)=CUSPEN
CAP(52,12)=CUSPEN
CAP(52,13)=CUSPEN
CAP(52,14)=CUSPEN
CAP(52,15)=CUSPEN
CAP(5,53)=CUSPEN
CAP(6,53)=CUSPEN
CAP(53,54)=CUSPEN
CAP(54,12)=CUSPEN
CAP(54,13)=CUSPEN
CAP(54,14)=CUSPEN
CAP(54,15)=CUSPEN
CAP(16,32)=CUSPEN
CAP(17,33)=CUSPEN
CAP(18,34)=CUSPEN
CAP(19,35)=CUSPEN
CAP(24,16)=CUSPEN
CAP(25,17)=CUSPEN
CAP(26,18)=CUSPEN
CAP(27,19)=CUSPEN
```

```
CAP(12,59)=CUSPEN
CAP(13,59)=CUSPEN
CAP(14,59)=CUSPEN
CAP(15,59)=CUSPEN
CAP(12,36)=CUSPEN
CAP(13,37)=CUSPEN
CAP(14,38)=CUSPEN
CAP(15,39)=CUSPEN
CAP(47,12)=CUSPEN
CAP(48,13)=CUSPEN
CAP(49,14)=CUSPEN
CAP(50,15)=CUSPEN
CAP(16,36)=CUSPEN
CAP(17,37)=CUSPEN
CAP(18,38)=CUSPEN
CAP(19,39)=CUSPEN
```

6- CUSTO SIMETRICO DE PENALTI ASSOCIADO A DSS1(K,L)

```
DO I=1,N
DO J=1,N
CSP(I,J)=0.D0
ENDDO
ENDDO
```

```
DO I=1,NC+1
```

```
CSP(12,I)=CUSPEN
CSP(13,I)=CUSPEN
CSP(14,I)=CUSPEN
CSP(15,I)=CUSPEN
CSP(I,12)=CUSPEN
CSP(I,13)=CUSPEN
CSP(I,14)=CUSPEN
CSP(I,15)=CUSPEN
CSP(16,I)=CUSPEN
CSP(17,I)=CUSPEN
CSP(18,I)=CUSPEN
CSP(19,I)=CUSPEN
CSP(I,16)=CUSPEN
CSP(I,17)=CUSPEN
CSP(I,18)=CUSPEN
CSP(I,19)=CUSPEN
ENDDO
```

```
DO I=1,N
DO J=1,N
```

```
IF(I.EQ.J) THEN
CSP(I,J)=0.0D0
ENDIF
ENDDO
ENDDO
```

```
CUSTO CSF
```

```
DO I=1,N
DO J=1,N
```

```
CSF(I,J)=0.D0
ENDDO
ENDDO
```

```
CUSTO DE PENALTY
```

```
CSF(32,63)=CUSPEN
CSF(33,64)=CUSPEN
CSF(34,65)=CUSPEN
CSF(35,66)=CUSPEN
```

```
DEFINIÇÃO DOS VETORES POSIÇÃO
ESTE PROCEDIMENTO ATRIBUI AO ELEMENTO I A POSIÇÃO LV(I)
```

```
DO 110 I=1,N
LV(I)=I
LVO(I)=LV(I)
110 CONTINUE
```

```
CHAMADA DA SUBROTINA DA FUNÇÃO CUSTO:
```

```
OPEN(UNIT=8,FILE='SAIDA.DAT')
CALL FUNCAO
WRITE(*,120)Z
WRITE(8,120)Z
120 FORMAT(5X,'Z=',F15.2,5X,/)
ZO=Z
```

```
SC0=0.0
SC1=0.0
SC2=0.0
SC3=0.0
```

SC4=0.0
SC5=0.0
SZ1=0.0
SZ2=0.0
SZ3=0.0

CÁLCULO DO VALOR INICIAL DO PARÂMETRO DE CONTROLE (C0):

CALL SEED(RND\$TIMESEED)

$M0=8*NC*(N-1)/2$

OBSERVAÇÃO: O VALOR DE M0 É ARBITRÁRIO; POR EXEMPLO, VALORES MAIS ELEVADOS DESTES PARÂMETROS PODERIAM SER UTILIZADOS.

OBSERVAÇÃO:

1) ESTE PROCEDIMENTO FOI PROPOSTO DE FORMA A PERMITIR A ACEITAÇÃO DE TODAS AS TRANSIÇÕES PROPOSTAS; PORTANTO, AS DISTRIBUIÇÕES SERÃO REALMENTE ALEATÓRIAS.

2) O COMANDO RANDOM POSSUI A FUNÇÃO DE DETERMINAR UM NÚMERO ALEATÓRIO MAIOR DO QUE ZERO E MENOR OU IGUAL A UM.

VARIÁVEIS:

WM=MÉDIA DOS VALORES DO INCREMENTO APÓS AS TRANSIÇÕES;
M1=NÚMERO DE TRANSIÇÕES NAS QUAIS A NOVA DISPOSIÇÃO DOS ELEMENTOS APRESENTA UM CUSTO MENOR OU IGUAL AO DA DISPOSIÇÃO ANTERIOR;

M2=NÚMERO DE TRANSIÇÕES PARA AS QUAIS O CUSTO DA NOVA DISPOSIÇÃO APRESENTA UM CUSTO MAIOR AO DA DISPOSIÇÃO ANTERIOR;

M3=NÚMERO DE TRANSIÇÕES NAS QUAIS, APESAR DO CUSTO DA NOVA DISPOSIÇÃO PROPOSTA DOS ELEMENTOS SER SUPERIOR AO CUSTO DA DISPOSIÇÃO ANTERIOR TEM-SE: $(EXP(-W/CK)) > (NÚMERO ALEATÓRIO ENTRE 0.0 E 1.0)$;

M1=0
M2=0
M3=0
WM=0.0
ZMI=0.0

```

DO 130 LL=1,M0
CALL RANDOM(RANVAL)
I1=INT(NC*RANVAL)+1
140 CALL RANDOM(RANVAL)
I2=INT(N*RANVAL)+1
IF((I2.EQ.I1).OR.(LP(I2).EQ.1)) GOTO 140

CALL INCREM(I1,I2)
Z=Z+W
ZMI=ZMI+Z
LAUX=LV(I1)
LV(I1)=LV(I2)
LV(I2)=LAUX

IF(Z.LE.ZO)THEN
ZO=Z
DO 150 I=1,N
LVO(I)=LV(I)
150 CONTINUE
END IF

IF(W.LE.0.0) THEN
M1=M1+1
ELSE
M2=M2+1
WM=WM+W
END IF
130 CONTINUE

WM=WM/FLOAT(M2)
ZMI=ZMI/FLOAT(M0)

X0= RAZÃO DE ACEITAÇÃO INICIAL;

(X=NÚMERO DE TRANSIÇÕES ACEITAS/NÚMERO DE TRANSIÇÕES
PROPOSTAS)

O VALOR DE X0 DEVE SER PRÓXIMO DE 1 DE FORMA A PERMITIR A
ACEITAÇÃO DE PRATICAMENTE TODAS AS TRANSIÇÕES PROPOSTAS;

X0=0.99
C0=WM/(LOG(FLOAT(M2))/(FLOAT(M2)*X0-FLOAT(M1)*(1.0-X0))))

CK=C0
WRITE(*,155)
WRITE(8,155)
155 FORMAT(7X,'CK',15X,'ZM',15X,'X',15X,'DR',15X,'SIGMA')

```

 CHAMADA DA SUBROTINA DA CADEIA DE MARKOV

 160 CALL MARKOV

CHAMADA DA SUBROTINA DA DERIVADA:

 CALL DERIVA

CRITÉRIO DE PARADA:

NESTE ÍTEM DO PROGRAMA, TEM-SE O ESTABELECIMENTO DO CRITÉRIO DE PARADA DO ALGORÍTMO DE SIMULATED ANNEALING. PARA OS CASOS NOS QUAIS ESTE CRITÉRIO DE PARADA NÃO É SATISFEITO, TEM-SE O CÁLCULO DE UM NOVO VALOR DO PARÂMETRO DE CONTROLE(CK);

D=0.01
 T=0.00001

```

IF (SIGMA2.LE.0.0) SIGMA2=0.0
SIGMA=SQRT(SIGMA2)
WRITE(*,170)CK,ZM,X,DR,SIGMA
WRITE(8,170)CK,ZM,X,DR,SIGMA
170  FORMAT(2X,F12.3,5X,F12.2,5X,F8.5,5X,F12.5,5X,F14.2)
      P=(CK*DR)/ZMI
      IF (SIGMA.EQ.0.D0) THEN
        CK=0.0
      ELSE

        CK=(CK*SIGMA)/(SIGMA+(CK*LOG(1.0+D))/3.0)
      CK=(CK*0.95)
      ENDIF
      IF ((SC0.LE.200).OR.(P.GT.T)) GOTO 160

      WRITE(*,180)Z,ZO
      WRITE(8,180)Z,ZO
      DO 190 I=1,NC
        WRITE(*,200)I,LV(I),LVO(I),XC(LVO(I)),YC(LVO(I)),ZC(LVO(I))
      WRITE(8,200)I,LV(I),LVO(I),XC(LVO(I)),YC(LVO(I)),ZC(LVO(I))
180  FORMAT(5X,'Z=',F12.2,5X,'ZO=',F12.2,5X,/)
200  FORMAT(5X,'I=',I3,5X,'LV(I)=' ,I3,5X,'LVO(I)=' ,I3,5X,'XO=' ,F9.2,5X,
      +'YO=' ,F9.2,5X,'ZO=' ,F9.2)
190  CONTINUE
  
```

CLOSE(8)
END

OBSERVAÇÃO: CÁLCULO DO DECRÉSCIMO DO PARÂMETRO DE CONTROLE (CK):

D=PARÂMETRO DE DISTÂNCIA; É UM PEQUENO VALOR POSITIVO; PEQUENOS VALORES DE D IMPLICAM EM PEQUENOS DECRÉSCIMOS EM CK.

T=PARÂMETRO DE PARADA;

*****SUBROTINA DA CADEIA DE MARKOV*****

ESTA SUROTINA É DESTINADA AO CÁLCULO DA SEQUÊNCIA DE MARKOV.

SUBROUTINE MARKOV

DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS:

IMPLICIT REAL *8 (W,Z,B,S,X,Y,D,C,T,A,P,G)
 DIMENSION LV(1000),LVO(1000),LP(1000)
 DIMENSION CSN1(1000,1000),DSN1(1000,1000)
 DIMENSION CAV(1000,1000)
 DIMENSION B(1000,1000),DSV(1000,1000),DAV(1000,1000)
 DIMENSION DAEC(1000,1000),DSS1(1000,1000)
 DIMENSION CAP(1000,1000),CSP(1000,1000)
 DIMENSION DSFP(1000,1000),CSF(1000,1000)
 COMMON/AREA1/LV,LVO,LP
 COMMON/AREA2/DSN1,DSV,DAV
 COMMON/AREA3/DAEC,DSS1,DSFP
 COMMON/AREA4/B,CSN1,CAV
 COMMON/AREA5/CAP,CSP,CSF
 COMMON/VALOR/N,NC,Z,W,CK,ZO,W1,W2,W3,W4,W5,W6
 COMMON/MARK/M1,M2,M3
 COMMON/RMARK/WM,ZM,SIGMA2,X
 COMMON/DERIV/SC0,SC1,SC2,SC3,SC4,SC5,SZ1,SZ2,SZ3,DR

CÁLCULO DO COMPRIMENTO DA CADEIA DE MARKOV (LK):

$LK=8*(NC*(N-1))/2$

CALL SEED(RND\$TIMESEED)

```
M1=0
M2=0
M3=0
ZM=0.0
SIGMA2=0.0D0
CALL FUNCAO
DO 10 LL=1,LK
CALL RANDOM(RANVAL)
I1=INT(NC*RANVAL)+1
30 CALL RANDOM(RANVAL)
I2=INT(N*RANVAL)+1
IF((I1.EQ.I2).OR.(LP(I2).EQ.1))GOTO 30

CALL INCREM(I1,I2)
CALL RANDOM(RANVAL)
IF(W.LT.0.0)THEN
M1=M1+1
Z=Z+W
LAUX=LV(I1)
LV(I1)=LV(I2)
LV(I2)=LAUX
ELSE
IF(CK.EQ.0.0)THEN
AUX=0.0
ELSE
AUX=EXP(-W/CK)
END IF
IF (AUX.GT.RANVAL)THEN
M3=M3+1
Z=Z+W
LAUX=LV(I1)
LV(I1)=LV(I2)
LV(I2)=LAUX
END IF
END IF
IF(Z.LE.ZO)THEN
ZO=Z
DO 40 I=1,N
LVO(I)=LV(I)
40 CONTINUE
END IF
ZM=ZM+Z
SIGMA2=SIGMA2+(Z*Z)
10 CONTINUE
M2=LK-M1
ZM=ZM/FLOAT(LK)
SIGMA2=(SIGMA2/FLOAT(LK))-(ZM*ZM)
X=FLOAT(M1+M3)/FLOAT(M1+M2)
```

```

RETURN
END

```

OBSERVAÇÃO:

ZM=MÉDIA DOS VALORES DA FUNÇÃO CUSTO

X=RAZÃO DE ACEITAÇÃO

SIGMA=DESVIO PADRÃO

SIGMA2=QUADRADO DO DESVIO PADRÃO

*****SUBROTINA DA FUNÇÃO (Z): *****

ESTA SUROTINA É DAESTINADA AO CÁLCULO DA FUNÇÃO CUSTO,
PARA UMA DETERMINADA DISPOSIÇÃO DOS ELEMENTOS.

SUBROUTINE FUNCAO

DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS:

```

IMPLICIT REAL*8 (W,Z,B,S,X,Y,D,C,T,A,P,G)
DIMENSION LV(1000),LVO(1000),LP(1000)
DIMENSION CSN1(1000,1000),DSN1(1000,1000)
DIMENSION CAV(1000,1000)
DIMENSION B(1000,1000),DSV(1000,1000),DAV(1000,1000)
DIMENSION DAEC(1000,1000),DSS1(1000,1000)
DIMENSION CAP(1000,1000),CSP(1000,1000)
DIMENSION DSFP(1000,1000),CSF(1000,1000)
COMMON/AREA1/LV,LVO,LP
COMMON/AREA2/DSN1,DSV,DAV
COMMON/AREA3/DAEC,DSS1,DSFP
COMMON/AREA4/B,CSN1,CAV
COMMON/AREA5/CAP,CSP,CSF
COMMON/VALOR/N,NC,Z,W,CK,ZO,W1,W2,W3,W4,W5,W6
COMMON/MARK/M1,M2,M3
COMMON/RMARK/WM,ZM,SIGMA2,X
COMMON/DERIV/SC0,SC1,SC2,SC3,SC4,SC5,SZ1,SZ2,SZ3,DR

```

CÁLCULO DO VALOR DA FUNÇÃO CUSTO (Z):

Z=0.0D0

```

DO 10 I=1,N
  K=LV(I)

```

```

      DO 20 J=1,N
      L=LV(J)
      Z=Z+CSN1(I,J)*DSN1(K,L)+CAV(I,J)*DAV(K,L)+CAP(I,J)*DAEC(K,L)
      Z=Z+CSP(I,J)*DSS1(K,L)+CSF(I,J)*DSFP(K,L)
20    CONTINUE
      Z=Z+B(I,K)
10    CONTINUE
      RETURN
      END

```

*****SUBROTINA DO INCREMENTO DA FUNÇÃO CUSTO(W):*****

ESTA SUROTINA POSSUI COMO FINALIDADE O CÁLCULO DO INCREMENTO DA FUNÇÃO CUSTO, APÓS A REALIZAÇÃO DA TROCA DE POSIÇÃO ENTRE OS ELEMENTOS A E B (OU SEJA, APÓS TER SIDO PROPOSTA UMA NOVA ALOCAÇÃO DOS ELEMENTOS).

SUBROUTINE INCREM (I1,I2)

DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS:

```

      IMPLICIT REAL *8 (W,Z,S,B,X,Y,D,C,T,A,P,G)
      DIMENSION LV(1000),LVO(1000),LP(1000)
      DIMENSION CSN1(1000,1000),DSN1(1000,1000)
      DIMENSION CAV(1000,1000)
      DIMENSION B(1000,1000),DSV(1000,1000),DAV(1000,1000)
      DIMENSION DAEC(1000,1000),DSS1(1000,1000)
      DIMENSION CAP(1000,1000),CSP(1000,1000)
      DIMENSION DSFP(1000,1000),CSF(1000,1000)
      COMMON/AREA1/LV,LVO,LP
      COMMON/AREA2/DSN1,DSV,DAV
      COMMON/AREA3/DAEC,DSS1,DSFP
      COMMON/AREA4/B,CSN1,CAV
      COMMON/AREA5/CAP,CSP,CSF
      COMMON/VALOR/N,NC,Z,W,CK,ZO,W1,W2,W3,W4,W5,W6
      COMMON/MARK/M1,M2,M3
      COMMON/RMARK/WM,ZM,SIGMA2,X
      COMMON/DERIV/SC0,SC1,SC2,SC3,SC4,SC5,SZ1,SZ2,SZ3,DR

```

CÁLCULO DO INCREMENTO DA FUNÇÃO CUSTO (W)

K1=LV(I1)

K2=LV(I2)

W1=0.0D0

W2=0.0D0

```

W3=0.0D0
W4=0.0D0
W5=0.0D0
W6=0.0D0
W=0.0D0
DO 180 J=1,N

```

```

IF((J.EQ.I1).OR.(J.EQ.I2))GOTO 180

```

```

L=LV(J)

```

```

W1=W1+(CSN1(I1,J)-CSN1(I2,J))*(DSN1(K2,L)-DSN1(K1,L))
W1=W1+(CSN1(J,I1)-CSN1(J,I2))*(DSN1(L,K2)-DSN1(L,K1))

```

```

W2=W2+(CAV(I1,J)-CAV(I2,J))*(DAV(K2,L)-DAV(K1,L))
W2=W2+(CAV(J,I1)-CAV(J,I2))*(DAV(L,K2)-DAV(L,K1))

```

```

W4=W4+(CAP(I1,J)-CAP(I2,J))*(DAEC(K2,L)-DAEC(K1,L))
W4=W4+(CAP(J,I1)-CAP(J,I2))*(DAEC(L,K2)-DAEC(L,K1))

```

```

W5=W5+(CSP(I1,J)-CSP(I2,J))*(DSS1(K2,L)-DSS1(K1,L))
W5=W5+(CSP(J,I1)-CSP(J,I2))*(DSS1(L,K2)-DSS1(L,K1))

```

```

W6=W6+(CSF(I1,J)-CSF(I2,J))*(DSFP(K2,L)-DSFP(K1,L))
W6=W6+(CSF(J,I1)-CSF(J,I2))*(DSFP(L,K2)-DSFP(L,K1))

```

```

180 CONTINUE

```

```

W1=W1+(CSN1(I1,I2)-CSN1(I2,I1))*(DSN1(K2,K1)-DSN1(K1,K2))
W2=W2+(CAV(I1,I2)-CAV(I2,I1))*(DAV(K2,K1)-DAV(K1,K2))
W3=W3+B(I1,K2)+B(I2,K1)-B(I1,K1)-B(I2,K2)
W4=W4+(CAP(I1,I2)-CAP(I2,I1))*(DAEC(K2,K1)-DAEC(K1,K2))
W5=W5+(CSP(I1,I2)-CSP(I2,I1))*(DSS1(K2,K1)-DSS1(K1,K2))
W6=W6+(CSF(I1,I2)-CSF(I2,I1))*(DSFP(K2,K1)-DSFP(K1,K2))
W=W1+W2+W3+W4+W5+W6
RETURN
END

```

```

*****SUBROTINA DA DERIVADA*****

```

```

ESTA SUROTINA TEM COMO FINALIDADE O CÁLCULO DOS
PARÂMETROS NECESSÁRIOS PARA A ELABORAÇÃO DO CRITÉRIO DE
PARADA DO SUMULATED C ANNEALING. O AJUSTE FOI FEITO POR
UMA PARÁBOLA (CUJA EQUAÇÃO GENÉRICA É  $Z_{lc}=a+b*c+g*c*c$ ), COM
BASE NO MÉTODO DOS QUADRADOS MÍNIMOS.

```

```

SUBROUTINE DERIVA

```

DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS:

IMPLICIT REAL *8 (W,Z,S,B,X,Y,D,C,T,A,P,G)
 COMMON/DERIV/SC0,SC1,SC2,SC3,SC4,SC5,SZ1,SZ2,SZ3,DR
 COMMON/MARK/M1,M2,M3
 COMMON/RMARK/WM,ZM,SIGMA2,X
 COMMON/VALOR/N,NC,Z,W,CK,ZO,W1,W2,W3,W4,W5,W6

SC0=SC0+1
 SC1=SC1+CK
 SC2=SC2+(CK*CK)
 SC3=SC3+(CK*CK*CK)
 SC4=SC4+(CK*CK*CK*CK)
 SZ1=SZ1+ZM
 SZ2=SZ2+(ZM*CK)
 SZ3=SZ3+(ZM*CK*CK)

A11=(SC2/SC1)-(SC1/SC0)
 A21=(SC3/SC2)-(SC1/SC0)
 A12=(SC3/SC1)-(SC2/SC0)
 A22=(SC4/SC2)-(SC2/SC0)
 B1=(SZ2/SC1)-(SZ1/SC0)
 B2=(SZ3/SC2)-(SZ1/SC0)

CÁLCULO DAS CONSTANTES BETA E GAMA
 (CONSTANTE AUXILIARES NO CÁLCULO DA DERIVADA DA MÉDIA DA
 FUNÇÃO CUSTO)

IF (SC0 .EQ. 1) GOTO 100
 BETA=(B1*A22-B2*A12)/(A11*A22-A12*A21)
 GAMA=(B2*A11-B1*A21)/(A11*A22-A12*A21)

CÁLCULO DA DERIVADA DA MÉDIA DA FUNÇÃO CUSTO EM RELAÇÃO
 AO PARÂMETRO DE CONTROLE (DR) (PARA O CRITÉRIO DE PARADA);

DR=BETA+(2*GAMA*CK)

100 RETURN
 END

ANEXO 5

Tabelas de posições dos equipamentos das malhas

Tabela 1: Otimização das posições dos equipamentos na malha 5x5x5 ($\delta = 0,3\text{m}$).

Equipamento	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)	Equipamento	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)
1	15	0	20	34	15	5	5
2	10	0	20	35	0	10	5
3	20	0	15	36	20	0	0
4	20	0	10	37	15	5	0
5	20	0	20	38	10	0	0
6	20	5	20	39	15	0	0
7	0	20	0	40	5	15	5
8	20	5	0	41	5	0	0
9	15	10	0	42	20	0	5
10	20	15	0	43	0	5	0
11	15	0	5	44	0	10	0
12	5	5	5	45	15	20	0
13	15	15	5	46	0	15	0
14	20	10	5	47	10	5	10
15	0	0	5	48	15	10	10
16	10	10	5	49	15	10	15
17	20	20	5	50	10	0	15
18	20	15	10	51	10	5	15
19	5	0	10	52	5	10	10
20	10	0	5	53	5	5	15
21	20	5	10	54	0	5	10
22	20	10	15	55	0	20	10
23	20	5	15	56	15	20	10
24	15	0	10	57	10	20	10
25	15	5	10	58	15	15	15
26	15	5	15	59	5	10	0
27	15	0	15	60	10	15	10
28	0	20	5	61	5	20	5
29	10	20	5	62	10	5	0
30	5	15	10				
31	5	20	10				
32	10	15	0				
33	10	20	0				

Tabela 2: Otimização das posições dos equipamentos na malha 5x5x5 ($\delta = 0,3$).

Equipamentos	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)	Equipamentos	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)
1	15	0	20	32	5	10	0
2	15	5	20	33	15	20	0
3	20	0	10	34	5	5	0
4	20	0	15	35	5	15	5
5	20	5	20	36	20	0	0
6	20	0	20	37	15	0	0
7	0	15	0	38	15	5	0
8	20	15	0	39	10	0	0
9	20	5	0	40	10	20	5
10	20	15	10	41	15	10	0
11	15	0	5	42	20	0	5
12	15	15	5	43	0	0	0
13	20	10	5	44	10	15	0
14	5	0	5	45	0	10	0
15	10	5	5	46	10	20	0
16	0	5	5	47	15	10	15
17	20	20	5	48	15	10	10
18	0	0	10	49	5	0	15
19	5	5	10	50	15	5	15
20	20	10	15	51	10	10	15
21	20	5	10	52	10	10	10
22	10	0	10	53	10	15	15
23	20	5	15	54	10	15	10
24	15	5	10	55	0	15	10
25	15	0	10	56	20	15	15
26	10	0	15	57	15	15	15
27	15	0	15	58	10	5	15
28	0	20	0	59	10	10	0
29	0	20	5	60	10	20	10
30	5	20	0	61	5	20	5
31	0	15	5	62	5	10	5

Tabela 3: Otimização das posições dos equipamentos na malha 5x5x5 ($\delta = 0,1$).

Equipamentos	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)	Equipamentos	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)
1	15	0	20	33	5	0	0
2	15	5	20	34	5	10	0
3	20	0	10	35	5	20	5
4	20	0	15	36	20	0	0
5	20	5	20	37	10	5	0
6	20	0	20	38	15	0	0
7	0	20	0	39	15	10	0
8	20	20	5	40	15	20	5
9	20	15	0	41	15	15	0
10	15	15	5	42	20	0	5
11	20	5	0	43	0	5	0
12	20	10	5	44	0	15	0
13	5	5	5	45	0	10	0
14	10	0	5	46	15	20	0
15	15	5	5	47	15	10	10
16	10	10	5	48	15	15	10
17	0	0	5	49	15	5	15
18	5	0	10	50	15	10	15
19	10	5	10	51	10	10	15
20	20	20	10	52	5	10	10
21	20	15	10	53	0	5	15
22	20	5	15	54	0	5	10
23	20	10	15	55	0	15	5
24	20	5	10	56	10	15	10
25	15	0	10	57	5	15	10
26	15	0	15	58	5	5	15
27	10	0	15	59	10	15	0
28	0	10	5	60	15	20	10
29	20	20	0	61	10	20	5
30	10	20	10	62	5	15	5
31	10	20	0				
32	5	15	0				

Tabela 4: Otimização das posições dos equipamentos na malha 6x6x6 ($\delta = 0,3\text{m}$).

Equipamentos	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)	Equipamentos	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)
1	25	15	20	32	10	10	5
2	20	20	20	33	10	25	0
3	25	20	10	34	10	10	0
4	20	20	5	35	5	25	5
5	25	25	20	36	20	20	0
6	25	20	20	37	20	15	0
7	0	0	0	38	20	25	0
8	25	5	0	39	15	20	0
9	25	0	0	40	15	5	0
10	20	5	0	41	5	20	0
11	25	10	0	42	25	20	0
12	25	15	5	43	0	15	0
13	25	25	5	44	5	25	0
14	15	15	5	45	0	20	0
15	10	20	5	46	15	0	0
16	25	10	10	47	20	15	10
17	15	25	5	48	20	25	10
18	20	10	5	49	20	15	15
19	5	20	10	50	15	20	15
20	25	5	5	51	15	15	15
21	25	25	15	52	10	15	10
22	25	15	15	53	15	25	15
23	15	10	0	54	10	25	10
24	25	20	15	55	5	0	0
25	15	20	10	56	20	0	0
26	20	20	10	57	20	0	5
27	20	20	15	58	15	10	10
28	0	5	0	59	5	15	0
29	5	5	0	60	15	5	5
30	10	5	5	61	10	5	0
31	10	0	0	62	10	15	0

Tabela 5: Otimização das posições dos equipamentos na malha 6x6x6 ($\delta = 0,3$).

Equipamentos	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)	Equipamentos	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)
1	25	25	20	34	10	10	5
2	20	20	20	35	5	5	0
3	20	25	5	36	20	25	0
4	15	15	0	37	15	20	0
5	25	20	20	38	20	20	0
6	25	15	20	39	20	10	0
7	5	0	0	40	5	20	0
8	20	0	0	41	15	10	0
9	25	5	0	42	25	15	0
10	25	0	0	43	0	25	0
11	25	25	0	44	10	5	0
12	25	10	5	45	15	0	0
13	25	20	5	46	0	20	0
14	20	15	5	47	15	15	10
15	10	20	5	48	15	25	10
16	25	15	10	49	15	20	15
17	25	25	10	50	15	20	10
18	20	10	10	51	15	15	15
19	20	5	5	52	10	15	10
20	10	15	0	53	25	10	15
21	15	25	5	54	25	5	10
22	10	25	0	55	10	0	0
23	15	25	0	56	25	0	5
24	20	15	15	57	25	0	10
25	25	20	15	58	20	25	15
26	20	20	15	59	15	5	0
27	20	20	10	60	5	25	0
28	0	0	0	61	5	15	0
29	0	15	0	62	10	10	0
30	0	10	0				
31	5	10	0				
32	5	15	5				
33	15	10	5				

Tabela 6: Otimização das posições dos equipamentos na malha 6x6x6 ($\delta = 0,1$).

Equipamentos	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)	Equipamentos	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)
1	25	15	20	36	20	20	0
2	20	20	20	37	15	15	0
3	25	15	0	38	20	10	0
4	25	20	5	39	10	20	0
5	25	25	20	40	5	15	0
6	25	20	20	41	5	20	0
7	10	0	0	42	25	20	0
8	20	0	0	43	15	0	0
9	25	5	0	44	15	5	0
10	25	0	0	45	0	20	0
11	25	25	0	46	0	15	0
12	15	20	5	47	15	20	15
13	20	15	5	48	20	15	15
14	20	25	5	49	20	25	15
15	25	10	5	50	20	10	10
16	10	15	5	51	25	10	15
17	15	15	10	52	25	5	10
18	10	25	5	53	15	25	15
19	20	5	5	54	15	25	10
20	25	20	15	55	10	0	5
21	25	15	15	56	25	0	5
22	25	25	15	57	15	0	5
23	25	15	10	58	10	20	10
24	25	20	10	59	5	25	0
25	20	20	15	60	5	15	10
26	25	25	10	61	5	10	0
27	20	20	10	62	15	10	0
28	0	5	0				
29	5	10	5				
30	0	10	0				
31	5	20	5				
32	10	10	0				
33	15	10	5				
34	15	25	0				
35	5	5	0				

Tabela 7: Otimização das posições dos equipamentos na malha 7x7x7 ($\delta = 0,3$).

Equipamentos	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)	Equipamentos	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)
1	5	25	20	32	20	20	5
2	10	20	20	33	15	5	0
3	5	30	0	34	20	10	0
4	5	15	0	35	15	25	10
5	5	15	20	36	0	25	0
6	5	20	20	37	0	20	0
7	25	0	0	38	0	15	0
8	15	15	0	39	0	10	0
9	10	10	0	40	20	20	0
10	5	5	0	41	0	30	0
11	5	25	0	42	10	20	0
12	5	20	5	43	25	15	0
13	5	10	5	44	5	0	0
14	10	15	5	45	0	0	0
15	10	25	5	46	20	15	0
16	10	20	10	47	0	20	15
17	0	5	5	48	0	10	10
18	15	10	5	49	0	15	10
19	10	25	15	50	0	25	10
20	15	20	0	51	10	15	15
21	15	25	0	52	10	10	10
22	0	15	5	53	5	15	15
23	0	25	5	54	5	15	10
24	5	20	15	55	20	0	0
25	0	20	10	56	10	5	0
26	5	25	10	57	10	5	5
27	0	20	20	58	5	30	5
28	20	5	0	59	10	30	0
29	30	20	0	60	20	25	0
30	25	20	5	61	25	20	0
31	25	25	0	62	15	20	5

ANEXO 6

Gráficos de Desempenho do Algoritmo de SA

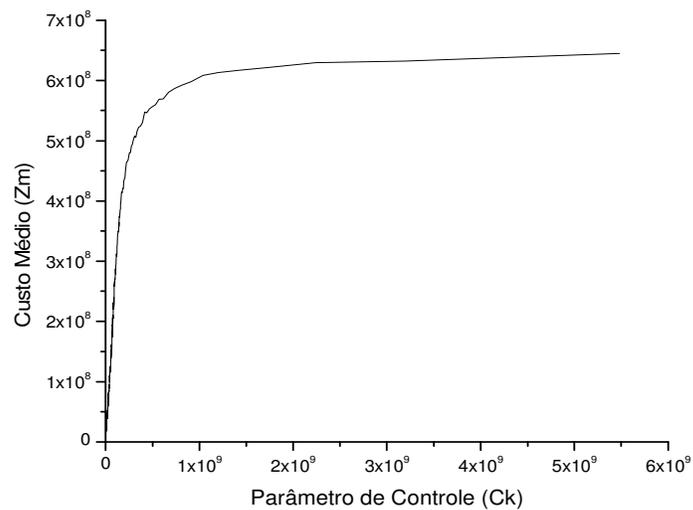
Gráficos com valores de $\delta = 0,3$ 

Gráfico 1: Variação do custo médio total (Z_m) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha 5x5x5).

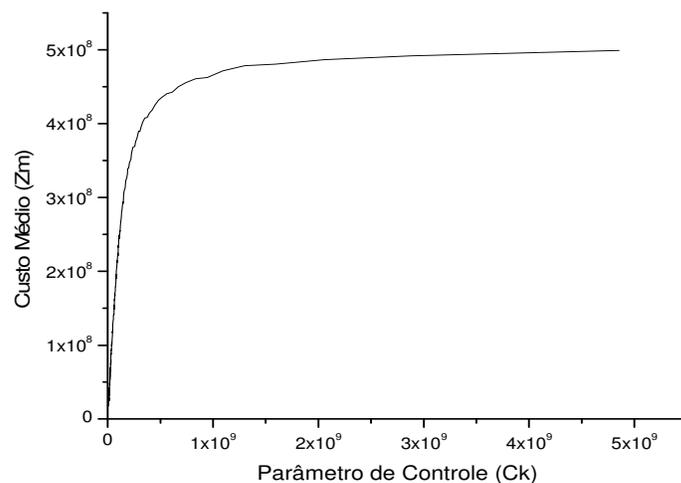


Gráfico 2: Variação do custo médio total (Z_m) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha 6x6x6).

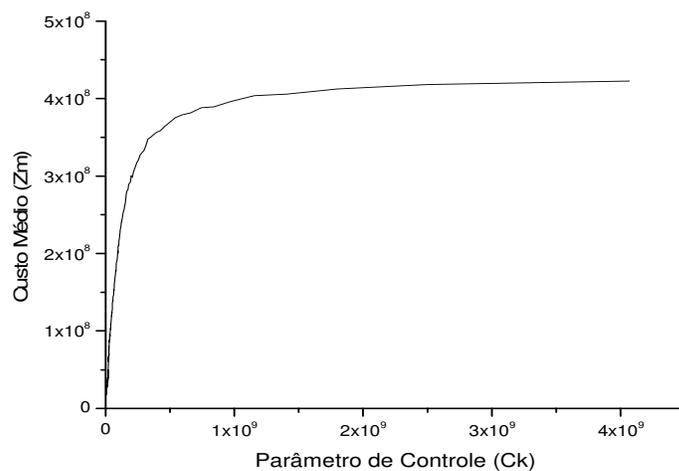


Gráfico 3: Variação do custo médio total (Z_m) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha $7 \times 7 \times 7$).

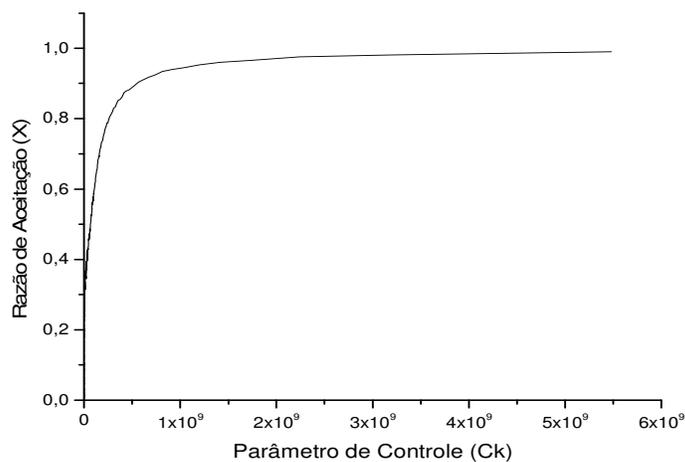


Gráfico 4: Variação da razão de aceitação (χ) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha $5 \times 5 \times 5$).

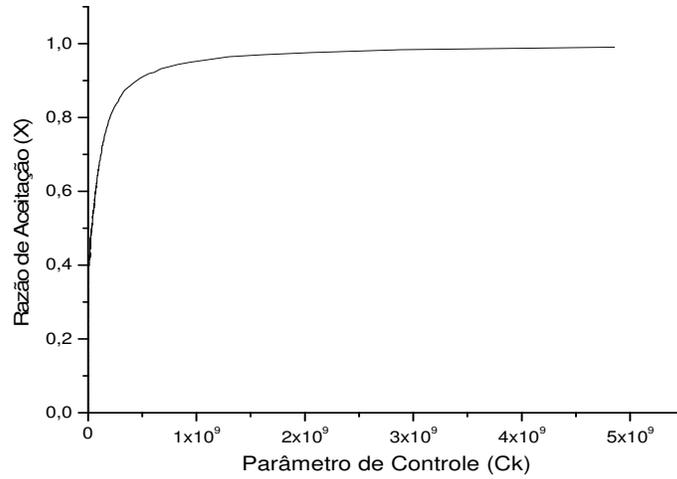


Gráfico 5: Variação da razão de aceitação (χ) em função do parâmetro de controle (C_k) (malha 6x6x6).

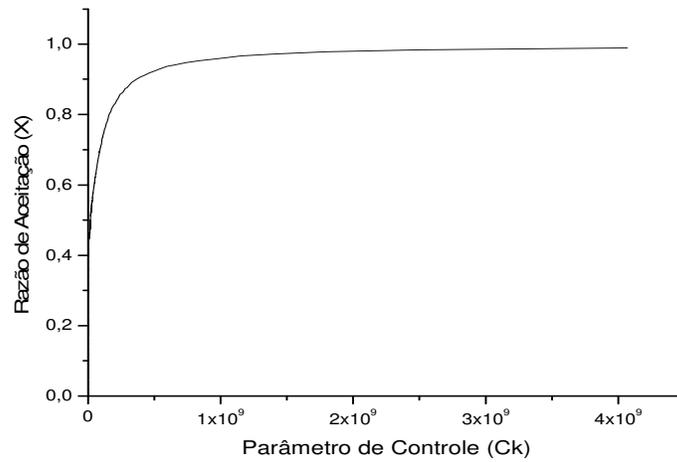


Gráfico 6: Variação da razão de aceitação (χ) em função do parâmetro de controle (C_k) (malha 7x7x7).

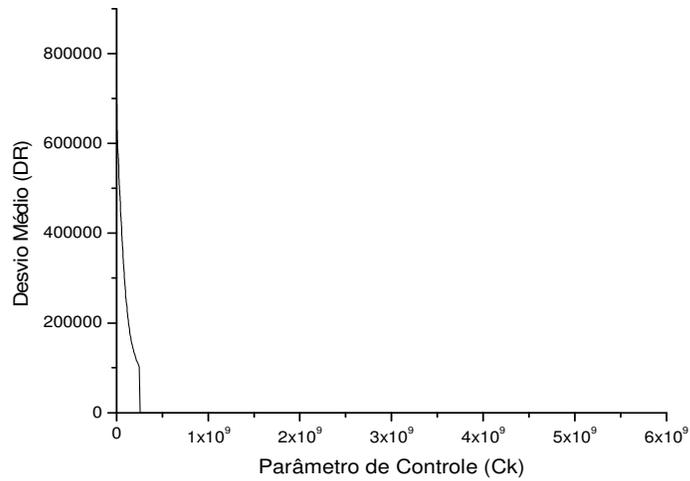


Gráfico 7: Variação da derivada relativa da média da função custo (DR) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha 5x5x5).

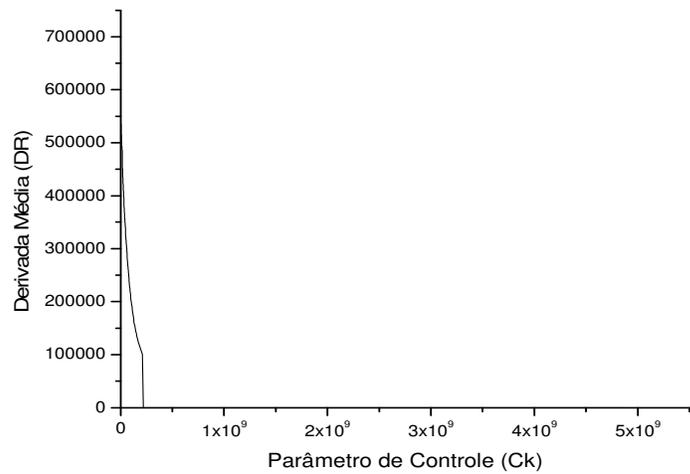


Gráfico 8: Variação da derivada relativa da média da função custo (DR) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha 6x6x6).

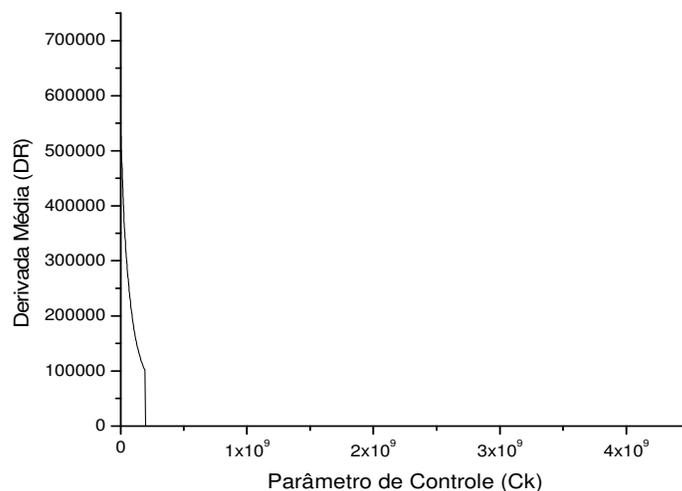


Gráfico 9: Variação da derivada relativa da média da função custo(DR) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha $7 \times 7 \times 7$).

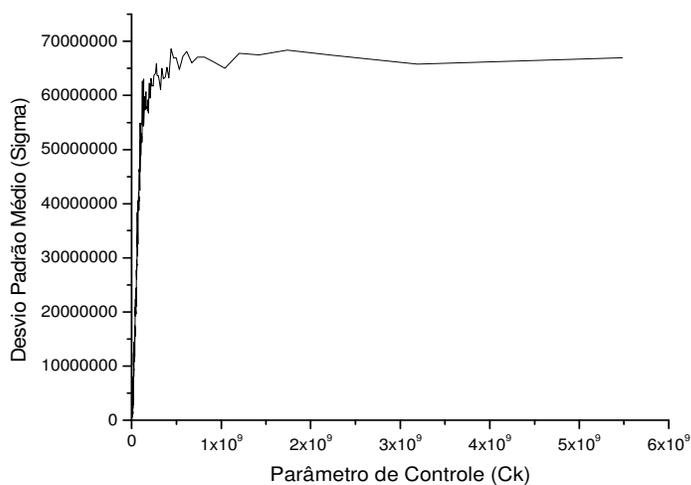


Gráfico 10: Variação do desvio padrão médio (σ) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha $5 \times 5 \times 5$).

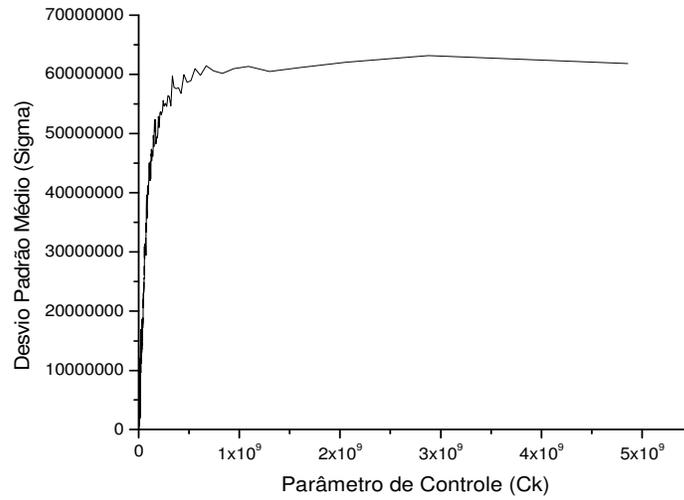


Gráfico 11: Variação do desvio padrão médio (σ) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha $6 \times 6 \times 6$).

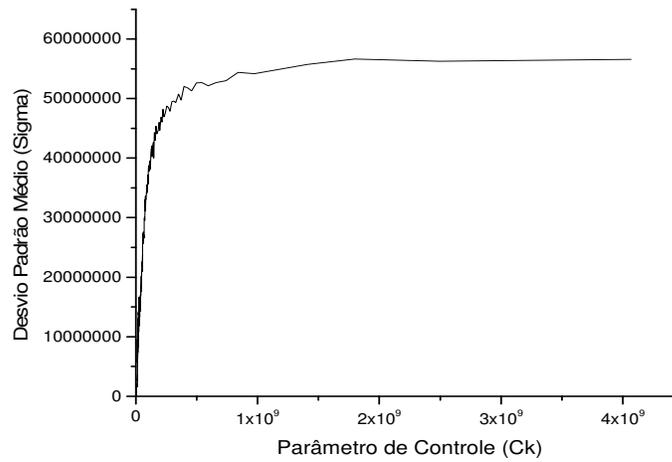


Gráfico 12: Variação do desvio padrão médio (σ) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha $7 \times 7 \times 7$).

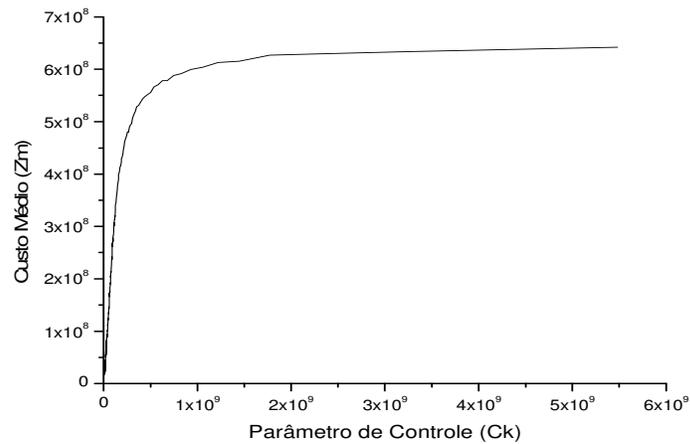
Gráficos com valores de $\delta = 0,3$ e a cadeia de Markov modificada.

Gráfico 13: Variação do custo médio total (Z_m) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha $5 \times 5 \times 5$).

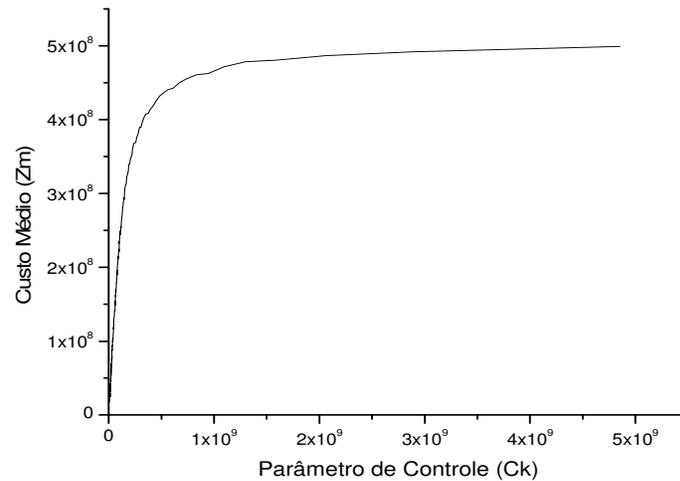


Gráfico 14: Variação do custo médio total (Z_m) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha $6 \times 6 \times 6$).

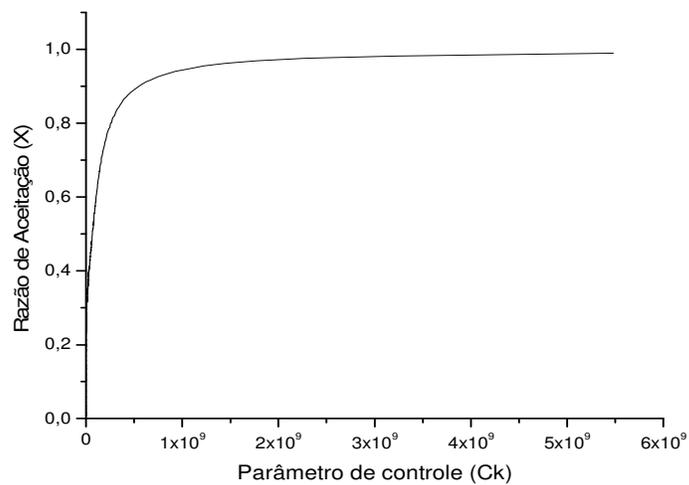


Gráfico 15: Variação da razão de aceitação (χ) em função do parâmetro de controle (C_k) (malha 5x5x5).

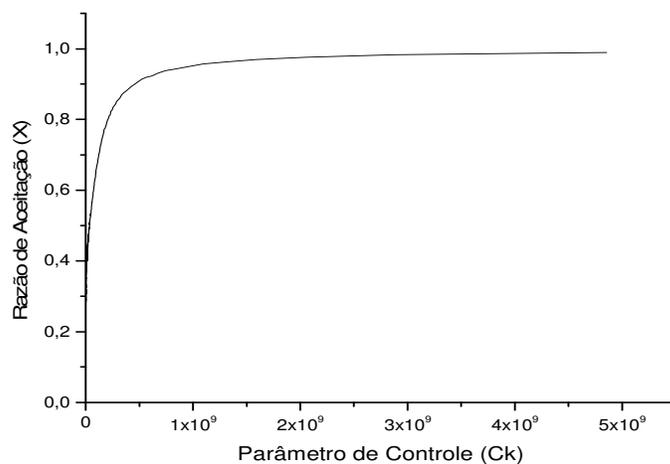


Gráfico 16: Variação da razão de aceitação (χ) em função do parâmetro de controle (C_k) (malha 6x6x6).

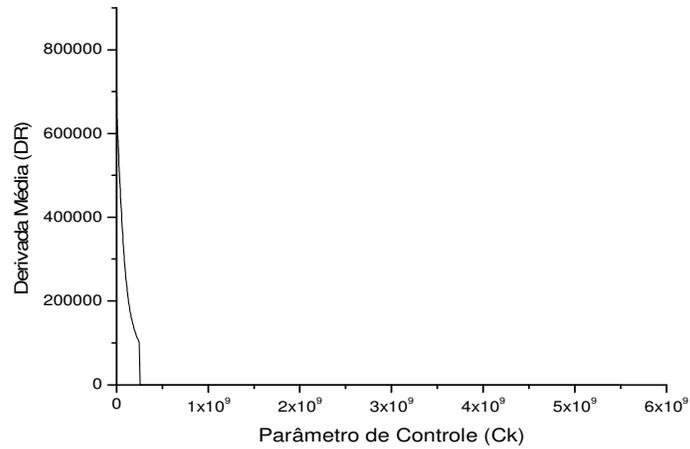


Gráfico 17: Variação da derivada relativa da média da função custo (DR) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha 5x5x5).

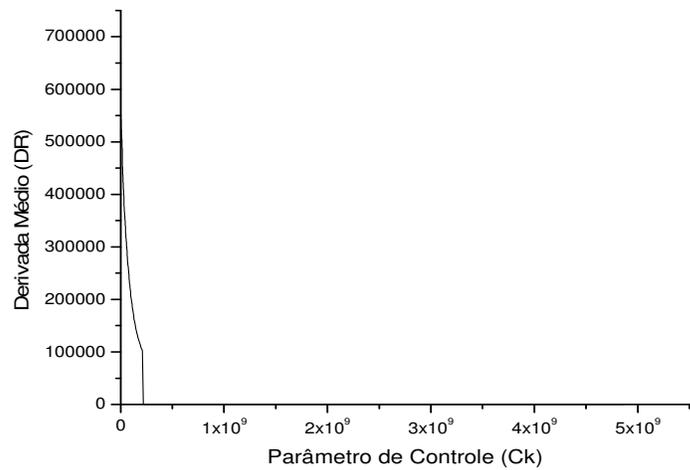


Gráfico 18: Variação da derivada relativa da média da função custo (DR) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha 6x6x6).

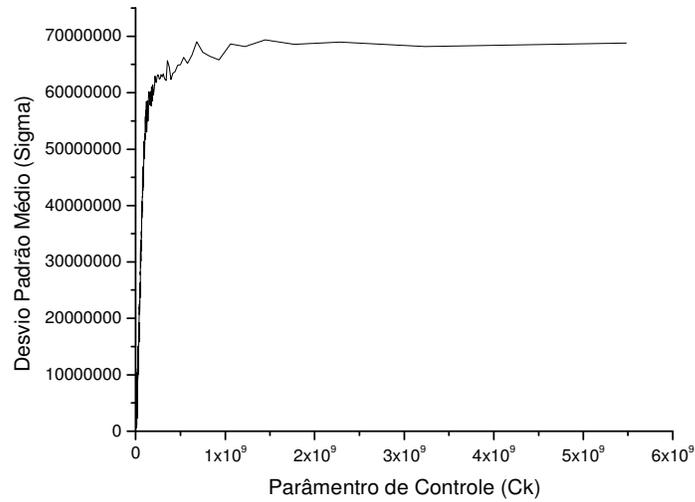


Gráfico 19: Variação do desvio padrão médio (σ) em função do parâmetro de controle (C_k) (malha 5x5x5).

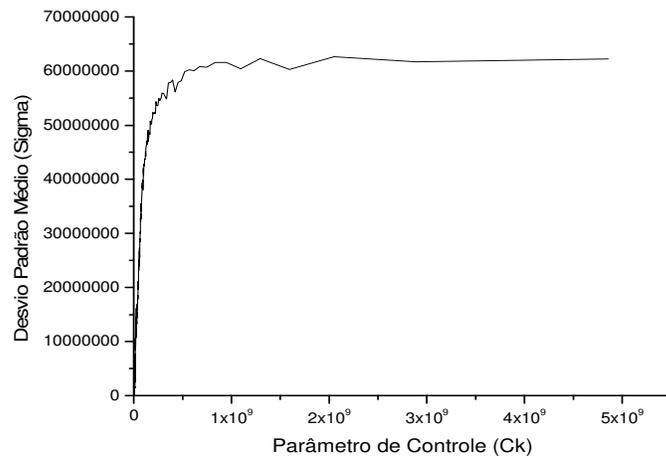


Gráfico 20: Variação do desvio padrão médio (σ) em função do parâmetro de controle (C_k) (malha 6x6x6).

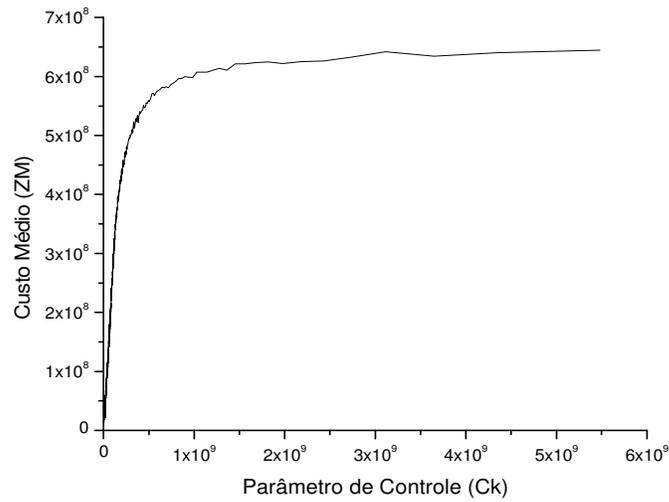
Gráficos com valores de $\delta = 0,1$.

Gráfico 21: Variação do custo médio total (Z_m) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha 5x5x5).

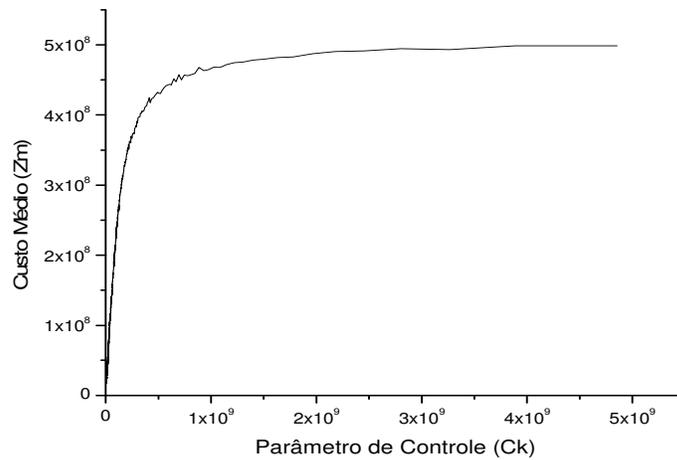


Gráfico 22: Variação do custo médio total (Z_m) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha 6x6x6).

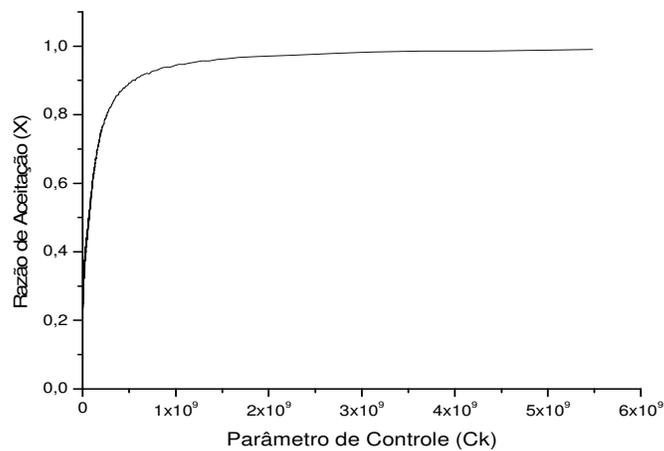


Gráfico 23: Variação da razão de aceitação (χ) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha 5x5x5).

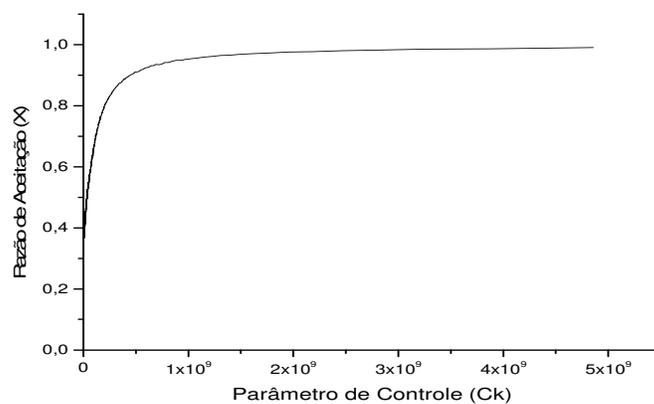


Gráfico 24: Variação da razão de aceitação (χ) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha 6x6x6).

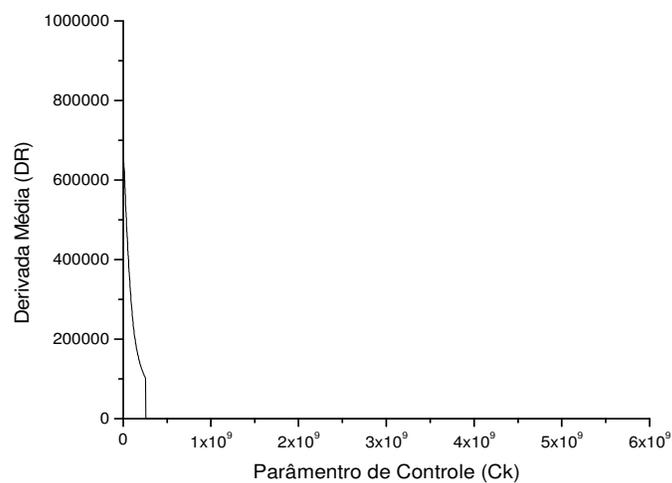


Gráfico 25: Variação da derivada relativa da média da função custo (DR) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha 5x5x5).

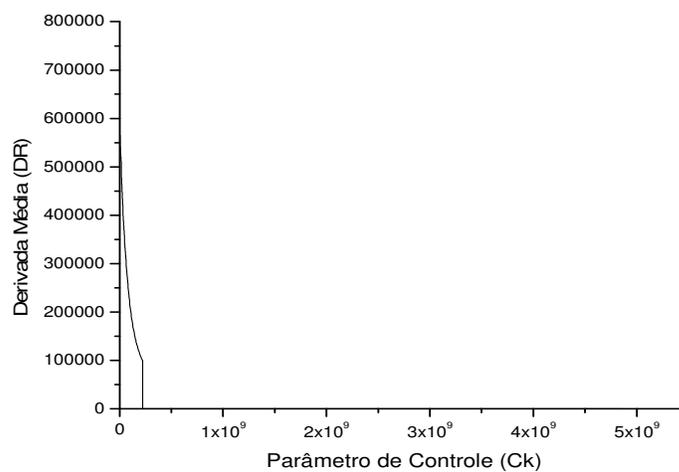


Gráfico 26: Variação da derivada relativa da média da função custo (DR) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha 6x6x6).

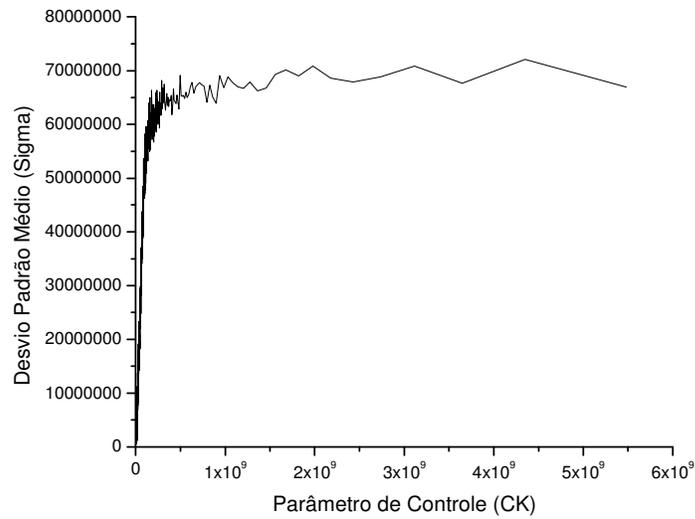


Gráfico 27: Variação do desvio padrão médio (σ) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha 5x5x5).

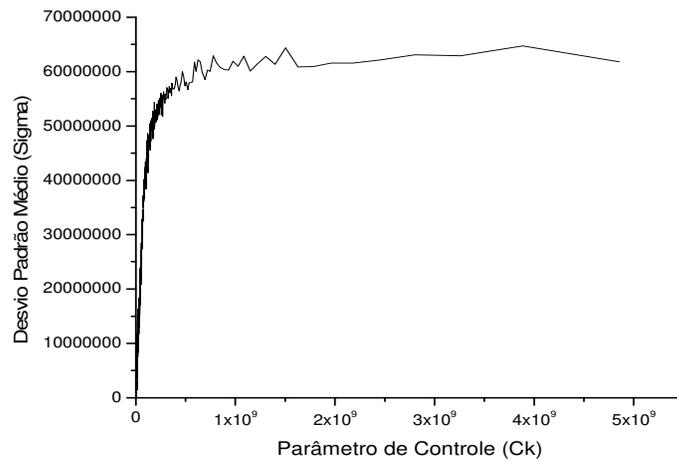


Gráfico 28: Variação do desvio padrão médio (σ) em função do parâmetro de controle (c_k) (malha 6x6x6).

ANEXO 7

Artigo Publicado

Capítulo do Livro da

AIDIC – Italian Association of Chemical Engineering

AIDIC – Conference Series, vol. 08, pp. 131-140, 2007.

USING A QUADRATIC ASSIGNMENT PROBLEM MODEL

Sérgio N. Franceira, Sheila S. de Almeida, Reginaldo Guirardello¹
Universidade Estadual de Campinas - Brazil, School of Chemical Engineering, ¹guira@feq.unicamp.br

The objective of this study is the optimization of the layout of a chemical process plant, minimizing the costs of piping, supports and pumping, while satisfying requirements of distance for safety, operation and maintenance.

The problem is formulated as a quadratic assignment problem, where the elements are allocated to a grid of predetermined positions. The objective function includes all costs, such as piping, pumping, installation and supports. The restrictions of a layout problem, such as minimum safety distances, are also included in the objective function as penalties.

The resulting quadratic assignment problem is solved using a simulated annealing method, due to the large size of the problem. The solution, although not proven optimal, is usually good and can be found in a short time.

The size and geometry of the grid should be carefully estimated for each case, because they can greatly influence the running time and the quality of the solutions. The proposed strategy was applied to a case study with 50 elements. The problem was solved in a small time, and the layout obtained was satisfactory.

1. INTRODUCTION

The main objective of a plant layout is to find the most economical spatial arrangement of process vessels and equipment and their connection by pipes, while satisfying requirements of construction, operation, maintenance and safety (Mecklenburgh, 1985). Therefore, the choice of the best layout is of great interest in the design of a chemical plant.

Most of the procedures for designing a plant layout come from practical experience (Anderson, 1982; Kern, 1977, 1978a; Mecklenburgh, 1985). A complete and final plant layout requires knowledge in the areas of chemical and mechanical engineering and considerations of geometrical design (Kern, 1978b).

An industrial process can be very complex and the optimization of the plant layout has a combinatorial nature that makes it very difficult to solve. The most difficult part is the determination of the best placement of the components, because of the non-convexity of the feasible region (the positions of the vessels must not overlap). Therefore, mathematical models can be very helpful in the design of a process plant layout.

A number of different models and approaches have been proposed for the optimization of process plant layout. Some of them use continuous domain models, while others use discrete models or a grid of possible positions, concerning the way components could be located in the process plant. Models based on continuous domain consider positions for the components that are represented by continuous variables, either as a mixed integer linear programming (Özyurt and Realff, 1999; Barbosa-Póvoa et al, 2001, 2002; Patsiatzis and Papageorgiou, 2002, 2003; Westerlund et al, 2005; Guirardello and Swaney, 2005), a mixed integer non-linear programming (Penteadó and Ciric, 1996; Papageorgiou and Rotstein, 1998) or a nonlinear optimization (Gunn and Al-Asadi, 1987). Models based on a grid of points consider positions in a discrete domain, where components could be assigned to (Georgiadis et al, 1999).

In this work, a quadratic assignment model based on a discrete domain approach is proposed. A grid of possible positions is defined, with a number of points greater than the number of components. The distance between neighboring possible positions is chosen so that it avoids overlapping of components. The objective function includes the costs of piping, pumping and supports, and a penalty cost for the requirements of minimum safety distances and restricted positions. Minimum distances can also be included in the definition of the distance between points in the grid. A simulated annealing algorithm is used for the minimization of the objective function.

2. MATHEMATICAL MODELING

2.1. Layout Problem Statement

The layout problem in this work has the objective of finding the best arrangement of process equipment so that the total cost is a minimum and the minimum distances between components are satisfied. Different pieces of equipment are not allowed to occupy the same space in the plant.

For a given number of process components, N_c , it is defined a three dimensional grid of points of possible positions. The total number of points in the grid, N , could be greater than or equal to the number of components.

The geometry of the grid of points and the distance between them are defined arbitrarily, but it can be done in a way so that two different components do not overlap and a minimum distance between components is satisfied. In this work, it was used a rectangular grid where all the points have the same distance d from their closest neighbor. Three coordinates define the position of each point (x_k, y_k, z_k) .

The layout problem is then formulated as quadratic assignment problem. The main strategy of the proposed approach is to transfer all the complexity of the layout problem into the definition of the matrices that appear in the objective function, which includes real costs (piping, pumping, installation, supports) and penalty costs (minimum safety distances, restricted positions).

2.2. Quadratic Assignment Problem

The quadratic assignment problem can be stated as (Love et al, 1988):

$$\min z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N a_{ijkl} \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} \quad (1)$$

subject to:

$$\sum_{i=1}^N x_{ik} = 1 \quad (k = 1, K, N) \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^N x_{ik} = 1 \quad (i = 1, K, N) \quad (3)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\}$$

where $x_{ik} = 1$ if component i is located at position k , and $x_{ik} = 0$ otherwise. Each component i then has its geometric center located at the point where it is assigned. The different applications of the QAP model can be found by the choice of the parameters a_{ijkl} and construction of the grid. This construction is a fundamental stage, because it already restricts the number of feasible solutions.

In some cases, there may be more positions than components or the components may require different amounts of space. The first problem is solved using dummy components in the model, the second by dividing larger components into smaller subcomponents. This kind of strategy for the optimization of process plant layout was used by Newell (1973), which used a two dimensional grid. In this work, to guarantee a larger flexibility, more positions than real components are used.

The quadratic assignment problem (QAP) is a generalization of the traveling salesman problem (TSP), and therefore is a NP-complete problem. The techniques that can be used to solve exactly the QAP to find the optimal solution include branch-and-bound and cutting plane methods, but they are limited to small problems ($N \sim 20$) in order to be solved in an acceptable time with current hardware. Therefore, heuristic methods are usually applied for large problems.

One heuristic method frequently used is to find some initial assignment, then try to improve it by pair interchanges, until no interchange can improve the objective function (Love et al, 1988). However, this method may only result in a local optimum. The simulated annealing algorithm (Aarts and Korst, 1989) is also a good way to solve the quadratic assignment problem, since it can avoid such local optimal solutions.

2.3. Matrices Definitions

The constants a_{ijkl} in Equation (1) include all costs and penalty functions used in the model formulation. In this work, they are given by:

$$a_{ijkl} = b_{ik} \cdot \delta_{ij} + \sum_{m=1}^5 c_{ij}^{(m)} \cdot d_{kl}^{(m)} \quad (4)$$

where $\delta_{ij} = 1$ if $i = j$, and $\delta_{ij} = 0$ if $i \neq j$.

There are two kinds of costs in Equation (4): (i) costs that depend only on the position of a component in the plant layout (b_{ik}), such as installation, supports and piping from fixed points in the plant (pipe racks), and (ii) costs that depend on the relative positions between components ($c_{ij} \cdot d_{kl}$), such as piping, pumping and penalty costs. Thus, the matrices in Equation (4) are defined as follows:

- Distance matrix $d_{kl}^{(1)}$: this matrix is used to measure the Manhattan distance between two points k and l , given by:

$$d_{kl}^{(1)} = |x_k - x_l| + |y_k - y_l| + |z_k - z_l| \quad (5)$$

The matrix $d_{kl}^{(1)}$ is symmetric, i.e., $d_{kl}^{(1)} = d_{lk}^{(1)}$. It is used for a rough estimation of piping costs, since this kind of measure of distance does not take into account possible obstacles in the piping path. It is also used to estimate the part of pumping costs that depends on pipe length.

- Cost matrix $c_{ij}^{(1)}$

$$c_{ij}^{(1)} = \begin{cases} 0.5 \cdot c_{ij} & \text{if components } i \text{ and } j \text{ are connected} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

where c_{ij} is the unit cost of piping from component i to component j . It can also include pumping costs that are proportional to pipe length, such as friction. The factor 0.5 is used because, since $c_{ij}^{(1)}$ multiplies $d_{kl}^{(1)}$ and they are both symmetric, this cost is included twice in the objective function given by Equation (1).

- Distance matrix $d_{kl}^{(2)}$: this matrix is used to measure the vertical distance from point k to point l , if point k is below point l , given by:

$$d_{kl}^{(2)} = \begin{cases} z_l - z_k & \text{if } z_k \leq z_l \\ 0 & \text{if } z_k > z_l \end{cases} \quad (7)$$

The matrix $d_{kl}^{(2)}$ is not symmetric, i.e., $d_{kl}^{(2)} \neq d_{lk}^{(2)}$. It is used in the estimation of the part of pumping costs that depends on vertical distance.

- Cost matrix $c_{ij}^{(2)}$

$$c_{ij}^{(2)} = \begin{cases} cp_{ij} & \text{if the flow is from component } i \text{ to component } j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

ANEXO 7

where cp_{ij} is the pumping cost between components i and j that are proportional to height. Since the direction of the flow matters in Equation (8), $cp_{ji} = 0$ if $cp_{ij} \neq 0$. Matrix $c_{ij}^{(2)}$ is multiplied by matrix $d_{kl}^{(2)}$ and they are both asymmetric. As a result, this pumping cost is properly included in the objective function. For example, assume that component i is located at position k and component j is located at position l , with flow from i to j . If k is below l , the pumping cost is included; if k is above l , this cost is not included, since it could flow by gravity. Also, since the flow is not from j to i , in Equation (1) this cost is not improperly included when indices are exchanged in the summation.

- Distance matrix $d_{kl}^{(3)}$

$$d_{kl}^{(3)} = \begin{cases} 1 & \text{if } z_k \leq z_l \\ 0 & \text{if } z_k > z_l \end{cases} \quad (9)$$

This asymmetric matrix is used in the evaluation of a penalty if some component cannot be assigned to a position k below another position l .

- Cost matrix $c_{ij}^{(3)}$

$$c_{ij}^{(3)} = \begin{cases} M & \text{if component } i \text{ must be above component } j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

This matrix multiplies matrix $d_{kl}^{(3)}$, which results in a penalty M in the objective function if component i is placed at a position below component j , where M is a big number. Both matrices are asymmetric, so that this penalty cost is properly included. It can be used to restrict components that are physically required to be placed at some relative positions above or below other components.

- Distance matrix $d_{kl}^{(4)}$

$$d_{kl}^{(4)} = \begin{cases} 1 & \text{if } |x_k - x_l| + |y_k - y_l| + |z_k - z_l| \leq p \cdot d \\ 0 & \text{if } |x_k - x_l| + |y_k - y_l| + |z_k - z_l| > p \cdot d \end{cases} \quad (11)$$

It is used for requirements of safety distances larger than the distance of neighboring points in the grid. In the case study tested in this paper it was used $p = 1$, which requires distances of more than one unit grid distance. However, if necessary, it is possible to define more than one matrix of this kind for the same problem, with different values for p and different matrices for restricted pairs of components. For some situations, the distance criterion $\max\{|x_k - x_l|, |y_k - y_l|, |z_k - z_l|\}$ could be more convenient to use.

- Cost matrix $c_{ij}^{(4)}$

$$c_{ij}^{(4)} = \begin{cases} M & \text{if components } i \text{ and } j \text{ must be kept separated} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

ANEXO 7

This matrix multiplies matrix $d_{kl}^{(4)}$, which results in a penalty in the objective function if components i and j are allowed to stay closer than or equal to the distance $p \cdot d$. Both matrices are symmetric, so the resulting penalty in the objective function will be $2 \cdot M$.

- Distance matrix $d_{kl}^{(5)}$

$$d_{kl}^{(5)} = \begin{cases} 1 & \text{if } |x_k - x_l| + |y_k - y_l| + |z_k - z_l| \neq d \\ 0 & \text{if } |x_k - x_l| + |y_k - y_l| + |z_k - z_l| = d \end{cases} \quad (13)$$

This symmetric matrix is used for long components, which require two positions in the grid. The real component is divided in two pseudo-components, which must be placed in adjacent grid points. A penalty is assigned if they are not. It could also be used if two real components must be close to each other.

- Cost matrix $c_{ij}^{(5)}$

$$c_{ij}^{(5)} = \begin{cases} M & \text{if components } i \text{ and } j \text{ must be kept close} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

This matrix multiplies matrix $d_{kl}^{(5)}$, which results in a penalty in the objective function if components i and j are not in adjacent positions in the grid. Both matrices are symmetric, so the resulting penalty in the objective function will be $2 \cdot M$.

- Cost matrix b_{ik}

This cost matrix includes all costs that are only related to assigning a component i to a position k , such as costs of installation, supports, piping from or to the pipe rack (assuming a fixed position for feeding and exit points in the pipe rack), and pumping between the pipe rack and the component.

3. Optimization Method

3.1. Size of the Problem

The layout problem formulated as a QAP, given by Equations (1) – (3), can be quite large. For example, for a cubic three dimensional grid with 10 points in each axis, the number of possible locations is 1000. Considering only 20 components to be located in these 1000 permissible positions, the number of ordered permutations is $(1000!)/(980!)$, which is approximately 8.3×10^{59} . If ghost components are considered, so that the number of components to be placed is the same as the number of possible positions, the number of binary variables x_{ik} is 1000000. Therefore, the use of exact methods to solve this large QAP is not practical.

3.2. Heuristic Method

The optimization in this work was done using the simulated annealing (SA) method (Aarts and Korst, 1989). Using the Metropolis algorithm, it generates a sequence of solutions, where the transition from solution a to solution b is evaluated by the acceptance criterion given by (Aarts and Korst, 1989):

$$P = 1 \quad \text{if} \quad \Delta z \leq 0 \quad (15)$$

$$P = \exp(-\Delta z/c_k) \quad \text{if} \quad \Delta z > 0 \quad (16)$$

ANEXO 7

where $\Delta z = f(b) - f(a)$, $f(a)$ and $f(b)$ are the values of the objective function for solutions a and b , and c_k is the control parameter. If P is greater than some random number generated from a uniform distribution on the interval $[0,1)$, then the new solution b is accepted; otherwise, the solution a is kept.

For the layout problem formulated as an assignment problem, a solution a is a given arrangement of components that satisfy the restrictions given by Equations (2) and (3). A new solution b is obtained from a by exchanging the positions of just two components, keeping the others in the same position. In order to avoid the interchange between two ghost components, which would change nothing in the layout, the first component is chosen arbitrarily from the set of N_c real components and the second component is chosen arbitrarily from the set of N components (real + ghosts), excluding the one already selected as the first. Therefore, the size Θ of the neighborhood of each solution is:

$$\Theta = \frac{N_c \cdot (N_c - 1)}{2} + N_c \cdot (N - N_c) \quad (17)$$

If $c_k = 0$, that would result in the pair interchange algorithm (Love et al, 1988), which does not accept any new solution with $f(b) > f(a)$, and may get stuck in a local optimum. A finite-time implementation of the SA algorithm, which can avoid these local optima, can be done by generating a homogenous Markov chain of finite length (L_k) for a finite sequence of decreasing values of the control parameter (c_k). The decrement of the control parameter is calculated using a distance parameter δ . The algorithm used in this work is based on the one described by Aarts and Korst (1989), using the initial acceptance ratio $\chi_0 = 0.99$, the stop parameter $\varepsilon_s = 0.00001$, and the length of each Markov chain was set to 4 times the size of the neighborhood Θ for each arrangement (Equation (17)). Different values of distance parameter δ were tested in the numerical simulations.

3.3. Function Evaluation

In order to apply the simulated annealing algorithm, the objective function needs to be calculated for a given arrangement. After applying Equation (4) into Equation (1) and using restrictions (2) and (3), the result is:

$$z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \left[\sum_{m=1}^5 c_{ij}^{(m)} \cdot d_{kl}^{(m)} \right] \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N b_{ik} \cdot x_{ik} \quad (18)$$

The use of Equation (18) is too time consuming. A faster way is the evaluation of the difference Δz between transitions, since only two components are in a different position at each transition. First, define the vector \mathbf{p} such that $p(i) = k$ if $x_{ik} = 1$. The objective function can then be written as:

$$z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[\sum_{m=1}^5 c_{ij}^{(m)} \cdot d_{p(i),p(j)}^{(m)} \right] + \sum_{i=1}^N b_{i,p(i)} \quad (19)$$

which does not use the binary variables, since it considers a given feasible assignment (with respect to restrictions given by Equations (2) and (3)).

Then, consider that component $i1$ at position $k1 = p(i1)$ changes position with component $i2$ at position $k2 = p(i2)$. The difference in the objective function due to this interchange is given by:

$$\Delta z = \Delta z_1 + \Delta z_2 + \Delta z_3 + \Delta z_4 \quad (20)$$

$$\Delta z_1 = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i_1, i_2}}^N \left[\sum_{m=1}^5 (c_{i_1, j}^{(m)} - c_{i_2, j}^{(m)}) \cdot (d_{k_2, l}^{(m)} - d_{k_1, l}^{(m)}) \right] \quad (21)$$

$$\Delta z_2 = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i_1, i_2}}^N \left[\sum_{m=1}^5 (c_{j, i_1}^{(m)} - c_{j, i_2}^{(m)}) \cdot (d_{l, k_2}^{(m)} - d_{l, k_1}^{(m)}) \right] \quad (22)$$

$$\Delta z_3 = \left[\sum_{m=1}^5 (c_{i_1, i_2}^{(m)} - c_{i_2, i_1}^{(m)}) \cdot (d_{k_2, k_1}^{(m)} - d_{k_1, k_2}^{(m)}) \right] \quad (23)$$

$$\Delta z_4 = (b_{i_1, k_2} - b_{i_1, k_1}) + (b_{i_2, k_1} - b_{i_2, k_2}) \quad (24)$$

where $l = p(j)$. Since the summations in Equations (21) and (22) do not consider that $j = i_1$ and $j = i_2$, this is accounted for in Equation (23).

Equation (20) is used in Equations (15) and (16) in order to test whether the transition will be accepted or not. If accepted, then the value of z is updated by adding Δz to it. Otherwise, the same value of z is kept.

4. CASE STUDY

The case study tested in this work is based on the polyester process plant presented by Gunn and Al-Asadi (1987). Since that example considered a small production rate of 30 tons per day of polyethylene terephthalate, it is a batch process (Gunn and Al-Asadi, 1987).

For this work, it was considered that the plant had 50 major components. Since specific data for this example was not available, the sizes for the components were arbitrarily set. The values for the costs were estimated from literature, assuming some values for pipe specifications and supports (Guthrie, 1974; Peters and Timmerhaus, 1991). The unit costs for pumping were considered as the costs of energy to move a material from one piece of equipment to another, and they can be obtained from the energy balance. Some distances for minimum spacing of equipment were taken from process equipment spacing tables (Anderson, 1982), in order to give adequate safety, while others were arbitrarily fixed due to lack of specific information.

5. RESULTS AND DISCUSSION

Cubic grids 5x5x5 (N=125), 6x6x6 (N=216) and 7x7x7 (N=343) were chosen to solve the problem, in order to offer a large flexibility to designate the components. It is important to point out that other kind of grids could be used (not cubic).

The distance between the grid points was arbitrarily set to 5m, which was large enough to avoid overlapping for all components, except for four pieces of equipment, which were divided in two parts each, due to their larger size. In order to keep these two parts together, penalty cost elements given by Equation (14) were defined for these parts. Therefore, the layout problem was modeled with 54 physical components.

The problem was solved in a PC 1.99GHz, with 480 Mbytes RAM. Table 1 presents the results for different grids using a penalty value M of 100000 and δ set to 0.30. Table 2 presents the results for different values of δ using the 5x5x5 grid and a penalty value M of 100000. Table 3 presents the results for different values of M using the 5x5x5 grid and δ set to 0.30.

Grid 5x5x5 resulted in the lowest objective function value, without incurring in any penalty (no violation of layout restrictions), for $\delta = 0.05$ and $M = 100000$. The results found with the 6x6x6 and 7x7x7 grids had higher objective function values, also without any penalty, which indicates that they were not really the optimal solution, since the 6x6x6 and 7x7x7 grids include the 5x5x5 grid as a subset.

ANEXO 7

Table 1. Best values found for different grid sizes ($\delta = 0.30$, $M=100000$)

Grid	Z final	CPU time (s)
5x5x5	112645.47	95
6x6x6	118476.81	383
7x7x7	113739.19	1025

Table 2. Best values found for different SA parameter δ (5x5x5 grid, $M=100000$)

δ	Z final	CPU time (s)
0.05	109025.56	497
0.10	113713.96	259
0.30	112645.47	95

Table 3. Best values found for different penalty values (5x5x5 grid, $\delta = 0.30$)

M	Z final	CPU time (s)
50000	115069.58	95
100000	112645.47	95
200000	114727.88	120

The costs of piping and equipment supports had a larger influence in the value of the function objective than the other costs. Thus the optimization placed the equipments near the pipe rack (feeding and exit points) and near each other. It was also observed that many pieces of equipment were located on the bottom or on the lowest part of the grid, in order to minimize the costs of supports for equipment.

6. CONCLUSION

The objective of this work was successfully obtained with the adequate placing of the equipment for a case study with a large number of components. Equipment support, piping and pumping costs were minimized. The algorithm employed was very efficient. The required computing time was acceptable, despite the great amount of variables. The results were satisfactory and all the layout requirements were satisfied.

The main idea of the proposed approach was to define the layout problem as a quadratic assignment problem, so that most of the usual restrictions are transformed into penalty functions. Then, a simulated annealing procedure was used to solve the resulting quadratic assignment problem. The proposed approach is easy to apply and can be used to find a reasonable layout in a short computational time, minimizing the cost while satisfying the requirements of space and safety distances. However, since it uses a heuristic procedure, it does not guarantee finding the global optimal solution.

The possible locations for the placement of all components are defined as a grid of points, which must be specified previously. The increase in the size of the grid offers a better flexibility to the method, although no advantage was observed in using larger grids for the particular case study tested in this work. Increasing the size of the grid results in a large increase in the number of possible locations and in the computational time, so that the optimal solution also becomes more difficult to be found. A good strategy to solve the problem is to begin the resolution with a small grid of possible locations and then to increase the size until no better result is found, which was done in this work.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to acknowledge CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brazil, for its financial support.

8. NOTATION

a_{ijkl}	objective function parameters in the general QAP
b_{ik}	cost matrix for component i at position k
c_{ij}	unit piping costs from component i to component j
$c_{ij}^{(m)}$	cost matrices between components i and j

cp_{ij}	pumping costs between components i and j
d	distance between adjacent points in the grid
$d_{kl}^{(m)}$	distance matrices between positions k and l
M	penalty value
N	number of points in the grid
N_c	number of real components
x_k, y_k, z_k	coordinates of position k in the x , y , and z axes
x_{ik}	binary variable for component i at position k
z	value of the objective function

9. REFERENCES

- Aarts, E., & Korst., J. (1989), *Simulated Annealing and Boltzmann machines*. John Wiley & Sons, Chichester - Great Britain.
- Anderson, F.V. (1982), Plant Layout. In Kirk Othmer, *Encyclopedia of Chemical Technology*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York, Vol. **18**, pp. 23-43.
- Barbosa-Póvoa, A.P., Mateus, R., & Novais, A.Q. (2001), Optimal two-dimensional layout of industrial facilities. *Int. J. Prod. Res.*, Vol. **39**, No. 12, pp. 2567-2593.
- Barbosa-Póvoa, A.P., Mateus, R., & Novais, A.Q. (2002), Optimal 3D layout of industrial facilities. *Int. J. Prod. Res.*, Vol. **40**, No. 7, pp. 1669-1698.
- Georgiadis, M.C., Schilling, G., Rotstein, G.E., & Macchietto, S. (1999), A general mathematical programming approach for process plant layout. *Computers chem. Engng*, Vol. **23**, pp. 823-840.
- Guirardello, R., & Swaney, R.E. (2005), Optimization of process plant layout with pipe routing, *Computers & Chemical Engineering*, Vol. **30**, pp. 99-114.
- Gunn, D.J., & Al-Asadi, H.D. (1987), Computer-aided layout of chemical plant: a computational method and case study. *Computer Aided Design*, Vol. **19**, No. 3, pp. 131-140.
- Guthrie, K.M. (1974), *Process Plant Estimating Evaluation and Control*. Craftsman Book Company of America, San Francisco – CA.
- Kern, R. (1977), How to manage plant design to obtain minimum cost. *Chemical Engineering*, Vol. **84**, No. 11, pp. 130-136.
- Kern, R. (1978a), Piperack design for process plants. *Chemical Engineering*, Vol. **85**, No. 3, pp. 105-112.
- Kern, R. (1978b), Arranging the housed chemical process plant. *Chemical Engineering*, Vol. **85**, No. 16, pp. 123-130.
- Love, R.F., Morris, J.G., & Wesolowsky, G.O. (1988), *Facilities Location – Models & Methods*. Elsevier Science Publishing Co., Inc., New York.
- Mecklenburgh, J.C. (1985), *Process Plant Layout*. Halsted Press - John Wiley & Sons, New York.
- Newell, R.G. (1973), Algorithms for the Design of Chemical Plant Layout and Pipe Routing. Ph.D. dissertation, Imperial College, London, England.
- Özyurt, D.B., & Realff, M.J. (1999), Geographic and process information for chemical plant layout problems. *AIChE Journal*, Vol. **45**, No. 10, pp. 2161-2174.
- Papageorgiou, L.G., & Rotstein, G.E. (1998), Continuous-domain mathematical models for optimal process plant layout. *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. **37**, pp. 3631-3639.
- Patsiatzis, D.I., & Papageorgiou, L.G. (2002), Optimal multi-floor process plant layout. *Computers Chem. Engng*, Vol. **26**, No. 4/5, pp. 575-583.
- Patsiatzis, D.I., & Papageorgiou, L.G. (2003), Efficient solution approaches for the multifloor process plant layout problem, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. **42**, No. 4, pp. 811-824.
- Penteado, F.D., & Ciric, A.R. (1996), An minlp approach for safe process plant layout. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **35**, pp. 1354-1361.
- Peters, M.M., & Timmerhaus, K.D. (1991), *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. 4th Edition, McGraw-Hill Inc., New York.
- Westerlund, J., Papageorgiou, L.G., Westerlund, T. (2005), A problem formulation for optimal N-dimensional allocation, *Chemical Engineering Transactions* Vol. **6**, Proceedings of the 7th Italian Conference on Chemical & Process Engineering – ICheaP7, Vol. **1**, pp. 185-190.