

## UM ALGORITMO MEMÉTICO PARA O PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO DE ARRANJO FÍSICO DE EQUIPAMENTOS EM UMA UNIDADE DE REFINARIA DE PETRÓLEO

**Clarice Vianna Gallinaro**

Chemtech

Rua da Quitanda, 50, Centro, Rio de Janeiro - RJ

claricevg@yahoo.com

**Artur Alves Pessoa**

Universidade Federal Fluminense

Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, Niterói - RJ

artur@producao.uff.br

### RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo apresentar uma ferramenta computacional para o projeto de arranjo físico de equipamentos de processo em uma unidade de refinaria de petróleo. O método de otimização proposto é uma adaptação do algoritmo memético de Merz *et* Freisleben (1999) para um problema de otimização de arranjo físico modelado como QAP (Problema Quadrático de Alocação). O método proposto tem como objetivo minimizar distâncias entre equipamentos, de forma a reduzir custos de tubulação e, conseqüentemente, o custo de implantação da unidade. Para este fim, o algoritmo apresenta métodos específicos de geração de indivíduos e de recombinação que evita inviabilidades. Foram consideradas três instâncias do problema de arranjo de equipamentos em uma unidade de refinaria, baseadas em um caso prático. Em comparação com o arranjo utilizado no caso prático, o arranjo gerado através do algoritmo proposto apresentou redução de custo nas três instâncias consideradas.

**PALAVRAS CHAVE.** Otimização, Arranjo Físico, Problema Quadrático de Alocação, QAP, Arranjo de Equipamento de Processo, Refinaria.

**Área principal (indique, em ordem de prioridade a área de conhecimento de seu artigo)**

### ABSTRACT

The aim of this work is to present a computational tool for positioning process equipments in an oil refinery unit. The optimization procedure proposed in this work is an extension of the memetic algorithm proposed by Merz *et* Freisleben (1999) for a facility layout problem modeled as a QAP (quadratic assignment problem). The proposed procedure targets minimizing distances between equipment to reduce piping material expenses, and as a result, decreases the overall construction costs of the unit. To achieve this goal, the algorithm introduces two specific procedures: one for creating the initial population and another one for recombining two individuals, both avoiding infeasible solutions. Based on a practical case study, three instances of the equipment layout problem were considered for the same refinery unit. When compared to the existing layout, the one generated by the proposed algorithm achieved significant cost reductions in all cases.

**KEYWORDS.** Optimization, Facility Layout, Quadratic Assignment Problem, QAP, Process Equipment Layout, Refinery.

**Main area (inform by priority the área of the article because JEMS system makes)**

## 1. Introdução

Com a descoberta das reservas de petróleo na camada do Pré-Sal e o início da produção de óleo nesses reservatórios em 2009, ampliaram-se no país os investimentos nas áreas de exploração, produção e refino de petróleo (PETROBRAS, 2009). Os investimentos na área de refino englobam a construção de novas refinarias, de novas unidades em refinarias existentes e a modernização de refinarias/unidades.

Em projetos de novas refinarias ou novas unidades, a definição do Layout, ou a elaboração do Arranjo de Equipamentos, é uma atividade de fundamental importância. Contudo, na prática de projeto de refinaria, a definição da posição dos equipamentos é usualmente realizada sem o auxílio de ferramentas de otimização, por um projetista experiente, exclusivamente a partir de seus conhecimentos técnicos e de sua experiência prática.

O projeto de refinaria ou de unidades de refino geralmente passa por três principais fases: de projeto básico, detalhado e construção/montagem. No projeto básico, é gerada uma planta de arranjo de equipamentos inicial, que é utilizada como base para os projetos de engenharia civil, elétrica, instrumentação, segurança e telecomunicações. Ao longo do projeto detalhado, esse documento será revisado e adaptado para atender ao detalhamento dos projetos dos equipamentos e das outras áreas. Assim, é fundamental que ele seja elaborado no projeto básico de forma a minimizar mudanças ao longo do projeto detalhado e, dessa forma, evitar impactos e retrabalho em todos os outros projetos, pois qualquer alteração no arranjo de equipamentos implica na alteração dos projetos de Segurança, Instrumentação, Civil, Tubulação e Elétrica. Além disso, por ser um elemento importante no caminho crítico do projeto, um atraso na sua elaboração podem refletir em atrasos no projeto.

A planta de arranjo de equipamentos de uma unidade de processo deve garantir a segurança e operacionalidade da planta a um custo eficiente (BAUSBACHER *et al.*, 1993). Nesse contexto, uma ferramenta de otimização de arranjo físico de equipamentos, que considere as restrições de operacionalidade e segurança, e proporcione redução no custo de tubulação, pode significar redução de prazo e investimento.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma ferramenta computacional para a resolução do problema de otimização do arranjo físico de equipamentos de processo para uma unidade de refino, minimizando os custos de tubulação entre os equipamentos, e assim, o custo de implantação da unidade.

Várias abordagens podem ser encontradas na literatura para resolução de problemas de otimização do arranjo físico. Loiola *et al.* (2007) identificam o QAP (*Quadratic Assignment Problem*) e suas variantes como as mais utilizadas na literatura. O QAP é classificado como um problema NP-difícil (SAHNI *et al.*, 1976), e além da dificuldade do ponto de vista teórico, o QAP é tido como um dos problemas mais difíceis também do ponto de vista prático, não sendo possível provar a otimalidade de soluções para certas instâncias com apenas trinta instalações a serem posicionadas (LOIOLA *et al.*, 2007).

Assim, no contexto das pesquisas recentes na área, significativa parcela apresenta heurísticas para resolução do QAP e suas variações (MELLER *et al.*, 1996 e SINGH *et al.*, 2005), e entre as heurísticas encontradas, podemos citar a busca tabu (MISEVICIUS, 2012), *simulated annealing* (MISEVICIUS, 2003), algoritmos evolucionários (MERZ *et al.*, 1999 e TAKAYASSU, 2010), GRASP (RESENDE *et al.*, 1996) e colônia de formigas (GAMBARDELLA *et al.*, 1999).

A heurística proposta é uma adaptação do algoritmo memético de Merz *et al.* (1999) para resolução do problema de otimização de arranjo físico de equipamentos em uma unidade de processo de refino modelado como uma variação do QAP.

O algoritmo proposto foi aplicado a três instâncias, baseadas em um caso prático, e os resultados obtidos foram comparados ao custo de tubulação do arranjo conhecido e utilizado no caso prático. Para as três instâncias o algoritmo gerou arranjos viáveis, com redução de custo de tubulação de cerca de 20% em relação ao arranjo de referência. Os três arranjos obtidos foram considerados adequados para a utilização prática mediante pequenos ajustes, conforme opinião de

especialista na área.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1 Arranjo de Equipamentos de Processo em uma Unidade de Refinaria

A alocação dos equipamentos em uma unidade de refino e a elaboração da planta de arranjo de equipamentos, documento que indica a posição de cada equipamento em uma unidade de processo de refino (TELLES, 2005), representam uma das mais importantes etapas do projeto de novas unidades de refino.

Para Bausbacher *et* Hunt (1993), o arranjo físico de equipamentos é geralmente elaborado por um projetista experiente, em função de seus conhecimentos prévios e experiências. Já segundo Telles (2005), a elaboração da planta de arranjo é obrigatoriamente um trabalho de equipe coordenado pelo especialista de tubulações, que define a disposição dos equipamentos considerando uma série de regras de boas práticas.

O arranjo de equipamentos em uma unidade de processo deve atender a diversos objetivos, e também respeitar algumas restrições. Para Bausbacher *et* Hunt (1993), o principal objetivo do projetista no projeto de arranjo de equipamentos deve ser garantir a segurança e operacionalidade da planta a um custo eficiente.

Para minimizar os custos do investimento total, Telles (2005) e Bausbacher *et* Hunt (1993) recomendam que o projetista defina a posição dos equipamentos de acordo com a sequência do processo, e mantenha próximos equipamentos que sejam interligados por tubulação de grandes diâmetros ou espessuras, de forma a reduzir a necessidade de tubulação.

Posicionar os equipamentos que irão receber a corrente aquecida perto dos fornos e dos trocadores de calor evita desperdício de energia com a dissipação do calor entre os equipamentos, ou gastos exagerados com isolamentos, e também significa redução de custos (BAUSBACHER *et* HUNT, 1993).

Entre as restrições a serem consideradas estão os limites físicos da unidade (chamados limites de bateria), as distâncias recomendadas entre equipamentos (TELLES, 2005), e o espaço livre ao redor de cada equipamento necessário para permitir o acesso de operadores e máquinas necessárias para operação e manutenção adequadas.

Para minimizar custos de manutenção e operação pode ser interessante considerar o agrupamento de determinados equipamentos em áreas comuns, em caso de equipamentos que precisam da mesma máquina para manutenção ou que requerem atenção constante de operadores (BAUSBACHER *et* HUNT, 1993). Por fim devem-se considerar condições de solo que influenciam nas bases, condições climáticas, como a direção do vento, e efeitos de flexibilidade, como lembra Telles (2005).

A prática de projeto de arranjo físico de equipamentos em refinaria usualmente não conta com a utilização de ferramenta de otimização ou outra ferramenta computacional, além de *softwares* de desenho. Segundo Bausbacher *et* Hunt (1993), o projetista precisa integrar conhecimentos e experiências e geralmente depende unicamente de suas habilidades pessoais para atingir os objetivos e respeitar as restrições identificadas na elaboração de um arranjo de equipamentos. Persson *et al.* (2009) sugere a elaboração de um desenho esquemático das tubulações entre equipamentos, para auxiliar o projetista a definir o posicionamento dos equipamentos de forma a minimizar as distâncias e custos.

### 2.2 Problema Otimização de Arranjo Físico como um QAP

Segundo Meller *et* Gau (1996), pode-se definir o problema de otimização de arranjo físico como o problema da determinação da posição de  $n$  departamentos indivisíveis no espaço disponível, de forma a minimizar os custos de transporte de material. Entretanto, diversas outras funções objetivo podem ser utilizadas para medir a eficiência de um arranjo físico, como a minimização da frequência de transporte de material, do capital investido ou dos custos de operação, maximização da eficiência e da segurança da planta, entre outros (REDDY,

VARAPRASAD *et VEERANNA*, 2012)

O QAP foi introduzido como solução para o problema de otimização de arranjo físico por Koopmans *et Beckman* (1957), e desde então problemas de otimização de arranjo físico têm sido tradicionalmente modelados como QAP e suas variantes, como o GQAP (*Generalized Quadratic Assignment Problem*) (PESSOA *et al.*, 2010) e o GQ3AP (*Generalized Quadratic 3-Dimensional Assignment Problem*) (HAHN *et al.*, 2010).

Na formulação QAP de Koopmans *et Beckman* (1957), o objetivo é encontrar o menor custo de locação de  $M$  departamentos em  $M$  locações, onde o custo de alocação do departamento  $i$  na locação  $k$  e do departamento  $j$  na locação  $l$  é função do fluxo entre os departamentos  $i$  e  $j$  ( $f_{ij}$ ) e da distância entre as locações  $k$  e  $l$  ( $d_{kl}$ ).

Como o QAP é um problema fortemente NP-difícil, é pouco provável que existam algoritmos eficientes capazes de resolvê-lo de forma exata. Por isso, para instâncias a partir de certo tamanho, torna-se necessário utilizar heurísticas e/ou meta-heurísticas para se encontrar boas soluções em um tempo computacional razoável.

### 2.3 Algoritmo Memético para o QAP de Merz e Freisleben

Os algoritmos evolucionários são algoritmos heurísticos que limitam o domínio do problema e tem como estratégia gerar soluções candidatas e checar em tempo polinomial se são viáveis (SANUSI, ZUBAIR *et OLADELE*, 2011). Dentre as soluções viáveis as melhores são selecionadas e podem ser recombinadas formando novas soluções, de forma a encontrar soluções adequadas, mas sem garantir que solução ótima será encontrada.

O algoritmo memético é baseado na teoria da evolução pela seleção natural, mas diferentemente do algoritmo genético, considera que uma evolução social e cultural ocorrida durante o ciclo de vida do indivíduo, pode também ser transmitida para as próximas gerações através do material genético (MERZ *et FREISLEBEN*, 1999).

No contexto de algoritmos evolucionários essas transformações ocorridas durante o ciclo de vida do indivíduo, através da sua interação com o meio e com outros indivíduos, foi representada por Moscato *et Norman* (1992) como uma busca local no vetor solução.

Na abordagem proposta por Merz *et Freisleben* (1999) para resolução do problema de otimização do arranjo físico, o vetor solução é composto por genes que representam as localidades disponíveis, onde serão alocados os departamentos. Assim, o alelo  $j$  posicionado no gene  $i$  indica que o departamento  $i$  está alocado na locação  $j$ .

No algoritmo memético de Merz *et Freisleben* (1999), a população inicial é gerada randomicamente. Segundo os autores, heurísticas construtivas para a geração da população não apresentam ganhos significativos em relação a uma população gerada randomicamente e melhorada através de busca local.

O método de busca local utilizado é a Heurística Pairwise Interchange - PI (BUFFA *et al.*, 1964), uma variação da heurística de melhoramento 2-opt. A partir da solução inicial, esse método troca de posição todos os departamentos, dois a dois, desfazendo cada troca que não melhora o custo da solução corrente.

O operador de recombinação proposto pelos autores não utiliza pontos de cruzamento e gera um único filho. Os alelos alocados nos genes do cromossomo gerado são retirados do gene correspondente de pelo menos um dos dois pais, assim toda a informação contida no filho provém de um dos dois pais, de forma que não há mutação implícita.

Os indivíduos são selecionados randomicamente para reprodução, com probabilidades iguais de serem selecionados. A população final (indivíduos originais e indivíduos gerados através de recombinação) é integralmente substituída pelos indivíduos mais bem avaliados.

A execução da busca local aumenta o tempo de processamento de cada indivíduo no algoritmo memético, limitando o número de indivíduos em cada geração (geralmente de 10 a 40), de forma que esses algoritmos podem convergir prematuramente. Para evitar que isso aconteça, os autores atribuem grande importância ao operador de mutação.

O operador de mutação é acionado quando o algoritmo converge, e provoca mutação

com uma alta taxa de mutação por gene em toda a população, com exceção do melhor indivíduo.

### 3. Metodologia de resolução

Como já visto, o problema do arranjo físico clássico é geralmente modelado através do Problema Quadrático de Alocação. De forma geral, a área total disponível para o empreendimento é dividida em subáreas de tamanhos iguais, em um número igual ao número de departamentos a serem alocados.

O arranjo dos departamentos na área total disponível é determinado de forma a minimizar custos de transporte entre eles e de forma que todos os departamentos sejam alocados a uma única subárea e cada subárea receba um único departamento.

No problema arranjo físico de equipamentos em uma unidade de processo de refinaria, os equipamentos têm tamanhos diferentes, e a área total disponível para a unidade é maior do que o somatório das áreas dos equipamentos. Também é necessário considerar uma restrição de distância mínima entre equipamentos para garantir a segurança da planta e condições adequadas de operação e manutenção.

Considerando essas características do problema, optou-se por discretizar a área total, formando uma malha de posições possíveis, às quais serão alocados os centroides de cada equipamento de processo. O cálculo das distâncias percorridas pela tubulação entre equipamentos será realizado considerando o centroide dos equipamentos como os pontos de entrada e saída, através do cálculo da distância retilínea.

Considerou-se a utilização de “*pipe-rack*” paralelo aos limites superior e inferior da unidade. *Pipe-rack* é uma estrutura usualmente utilizada nas unidades de processo que pode ser metálica ou de concreto, e tem como objetivo suportar e organizar as tubulações, bandejas e cabeamentos que percorrem a unidade.

O cálculo da distância entre equipamentos é realizado, portanto, considerando apenas a distância entre eles quando essa distância não atinge um limite máximo. Quando esse limite é ultrapassado, é considerada a passagem da linha pelo *pipe-rack*.

Como pode ser observado na Figura 1, existem casos em que a tubulação interliga três ou mais equipamentos, gerando pontos de bifurcação ou confluência de tubulação. Esses “nós” serão tratados na instância deste trabalho como equipamentos fictícios, com tamanho igual ao de uma posição da malha.

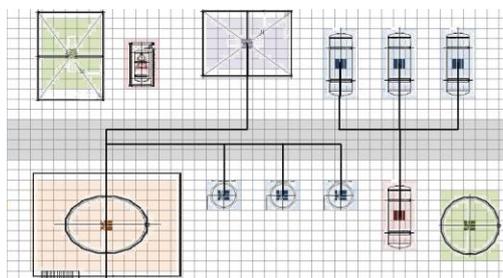


Figura 1: Exemplo de tubulação entre equipamentos em unidade de processo

Para verificar se a distância livre mínima entre equipamentos é respeitada, o algoritmo considera as dimensões externas dos equipamentos e verifica cada componente da distância retilínea, em  $x$  e em  $y$ .

Sendo:

$c_{ix}$  = coordenada  $x$  do centroide do equipamento  $i$

$c_{iy}$  = coordenada  $y$  do centroide do equipamento  $i$

$dim_{ix}$  = dimensão  $x$  do equipamento  $i$

$dim_{iy}$  = dimensão  $y$  do equipamento  $i$

$N_{ij}$  = distância mínima adotada entre os equipamentos  $i$  e  $j$

A restrição de distância livre mínima entre dois equipamentos A e B é violada quando:

$$|c_{ax} - c_{bx}| < N_{ab} + \left(\frac{dim_{ax} + dim_{bx}}{2}\right)$$

e

$$|c_{ay} - c_{by}| < N_{ab} + \left(\frac{dim_{ay} + dim_{by}}{2}\right)$$

### 3.1. Função Objetivo

A função objetivo do problema tem como objetivo minimizar o custo de implantação do empreendimento através da minimização dos custos de tubulação.

O custo de tubulação é dado por kg de material em função do tipo de matéria prima utilizada e dos tratamentos necessários, que por sua vez, variam conforme a vazão e as propriedades do fluido que circula entre cada par de equipamentos. O diâmetro e a espessura da linha, também determinados em função das propriedades do fluido, igualmente interferem no custo de tubulação.

A função objetivo, portanto, é a minimização do somatório dos produtos da distância entre cada par de equipamentos pelo custo de tubulação de interligação entre esses equipamentos, conforme abaixo:

Constantes:

$C_{ij}$  = Custo por kg de material para tubulação entre os equipamentos  $i$  e  $j$

$w_{ij}$  = Custo por metro de tubulação entre os equipamentos  $i$  e  $j$

$d_{kl}$  = Distância entre as locações  $k$  e  $l$

$de_{ij}$  = densidade da tubulação entre os equipamentos  $i$  e  $j$

$A_{ij}$  = Área da seção reta da tubulação entre os equipamentos  $i$  e  $j$

$OD_{ij}$  = Diâmetro externo da tubulação entre os equipamentos  $i$  e  $j$

$e_{ij}$  = Espessura da tubulação entre os equipamentos  $i$  e  $j$

Sendo:

$$w_{ij} = C_{ij} * de_{ij} * A_{ij}$$

$$A_{ij} = \frac{\pi}{4} [OD_{ij}^2 - (OD_{ij} - 2 * e_{ij})^2]$$

Função Objetivo:

$$\text{minimizar } \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{j \neq i}^N \sum_{l \neq j}^M w_{ij} d_{kl} x_{ik} x_{jl}$$

Sendo:

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, \text{ quando o equipamento } i \text{ está alocado na posição } k \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$$

### 3.2. Restrições

#### 3.2.1. Restrições de Locação de Equipamento

- Todos os equipamentos devem ser alocados;
- Cada equipamento deve ter o seu centroide alocado a uma única posição da malha;

$$\sum_{k=1}^M x_{ik} = 1, \text{ para todos os equipamentos } i$$

### 3.2.2. Restrições de Atribuição de Locação

- Cada posição deve ter um único centroide de equipamento correspondente;
- Nem todas as posições precisam ter um centroide alocado;

$$\sum_{i=1}^N x_{ik} \leq 1, \text{ para todas as posições } k$$

### 3.2.3. Restrições de Locação de Equipamento

Sendo:

$c_{ix}$  = coordenada x do centroide do equipamento i

$c_{iy}$  = coordenada y do centroide do equipamento i

$dim_{ix}$  = dimensão x do equipamento i

$dim_{iy}$  = dimensão y do equipamento i

$N_{ij}$  = distância mínima adotada entre os equipamentos i e j

$LBS_x$  = Limite de bateria superior da unidade (em x)

$LBI_x$  = Limite de bateria inferior da unidade (em x)

$lb(i)$  = Distância mínima necessária entre equipamento i e o Limite de Bateria

- A posição dos equipamentos deve respeitar a área total disponível, isto é, a partir do centroide onde determinado equipamento foi alocado, as dimensões do equipamento em questão não podem exceder os limites da unidade e devem respeitar a distância mínima especificada entre aquele tipo de equipamento e o limite de bateria;

$$c_{ix} + \frac{dim_{ix}}{2} \leq LBS_x - lb(i)$$

e

$$c_{iy} + \frac{dim_{iy}}{2} \leq LBS_y - lb(i)$$

e

$$c_{ix} - \frac{dim_{ix}}{2} \geq LBI_x + lb(i)$$

e

$$c_{iy} - \frac{dim_{iy}}{2} \geq LBI_y + lb(i)$$

- A distância livre entre os equipamentos (considerando as dimensões externas dos equipamentos) devem respeitar as distâncias mínimas definidas conforme normas internacionais, filosofia do cliente ou sua própria experiência ou conhecidos pelo projetista pela sua própria experiência;

$$|c_{ix} - c_{jx}| - \left( \frac{dim_{ix} + dim_{jx}}{2} + N_{ij} \right) \geq 0$$

ou

$$|c_{iy} - c_{jy}| - \left( \frac{dim_{iy} + dim_{jy}}{2} + N_{ij} \right) \geq 0$$

### 3.3. Algoritmo

O algoritmo proposto neste trabalho para resolução do problema conforme modelado nos itens 3.1 e 3.2 é baseado no memético proposto por Merz *et* Freisleben (1999) com modificações necessárias para torná-lo aplicável ao problema de arranjo de equipamentos.

Esse algoritmo tem com objetivo alocar o centroide de cada equipamento a uma determinada posição da área disponível para a unidade, minimizando custos de tubulação. Para isso, a solução gerada é um vetor de equipamentos, onde para cada centroide de equipamento será alocada uma determinada posição da planta definida por duas coordenadas (x, y).

Os algoritmos de geração e recombinação de soluções foram adequados às especificidades do problema de forma a evitar inviabilidades e permitir que boas soluções fossem encontradas mais rapidamente, melhorando a qualidade da solução final e a eficiência do algoritmo.

O algoritmo de geração de solução gera uma solução para cada equipamento do vetor solução através do sorteio aleatório entre todas as posições viáveis disponíveis no *grid* da planta. As posições viáveis são as posições do *grid* onde o centroide pode ser alocado de forma que a solução obtida não viole nenhuma das restrições identificadas no item 3.2, isto é, as extremidades do equipamento não podem ultrapassar os limites de bateria da unidade, o equipamento não pode se sobrepor a outros equipamentos já alocados e nem violar restrições de distância livre mínima em relação a esses equipamentos. Quando não há nenhuma posição viável disponível no *grid*, uma posição qualquer da malha é sorteada aleatoriamente.

A recombinação de soluções utilizada é um cruzamento uniforme que não utiliza pontos de cruzamento e gera um único filho, como no método de recombinação proposto por Merz *et* Freisleben (1999). No método apresentado pelos autores, sorteiam-se aleatoriamente entre os dois cromossomos pais, qual irá fornecer o alelo do gene correspondente para o cromossomo filho.

Novamente, optou-se por adaptar o método proposto de forma a facilitar a obtenção de soluções viáveis (em que nenhuma restrição é violada). E assim, foi desenvolvido um novo operador de recombinação, em que para cada gene do filho, verifica-se a viabilidade da solução de cada “pai” para aquele equipamento e seleciona-se a única alternativa viável, ou, aleatoriamente, uma entre as duas alternativas viáveis ou não viáveis.

Todos os indivíduos criados, através da geração inicial ou de recombinação são então avaliados através de um algoritmo de avaliação da solução gerada, baseada na função objetivo identificada no item 3.1.

Nessa etapa de avaliação é atribuído um custo de tubulação para cada solução gerada, calculado, conforme identificado na função objetivo, em função da distância entre dois equipamentos e do custo por metro de tubulação entre os dois equipamentos de acordo com o tipo de tubulação especificado entre eles.

Nesse algoritmo de avaliação também é feita a verificação de quantas restrições (item 3.2) são violadas pela solução que está sendo avaliada. O número total de restrições violadas pela solução é multiplicado por um custo de penalidade suficientemente alto resultando no custo de violação de restrições que deve ser somado ao custo de tubulação para obtenção do custo total da solução.

Após o cálculo do custo da solução, o algoritmo executa uma busca local na solução, formando-se novas soluções, que são igualmente avaliadas. Sempre que uma solução de menor custo é encontrada, ela substitui a solução inicial.

Após a avaliação, as soluções são ordenadas e as melhores soluções são selecionadas para seguirem à próxima geração. Como “melhores soluções” classificam-se as soluções que melhor resolvem o problema de otimização, ou seja, que apresentam menos violações de restrição e, no caso de empate, menores custos de tubulação.

O algoritmo também executa mutações aleatórias quando a distância entre as soluções atinge um limite mínimo ou quando não há variação na população ao longo de duas gerações, de forma a aumentar a diversidade da população e impedir que a solução convirja precipitadamente.

O algoritmo é finalizado quando atinge o limite máximo de gerações, definido como um parâmetro, fornecendo como solução a melhor solução encontrada até o momento.

## 4. Resultados

### 4.1 Instância

Para validação do algoritmo foi considerado um caso prático de projeto de arranjo físico de unidade de refinaria com 56 equipamentos. Foram identificados também 88 casos de “nós” de bifurcação/confluência de tubulação que foram tratados na instância como equipamentos fictícios, totalizando em 144 equipamentos a serem alocados. Foram considerados três valores para distância máxima percorrida pela tubulação entre dois equipamentos, sem necessidade de passar pelo *pipe-rack*, gerando três diferentes instâncias, sendo  $d_1 = 0$ ,  $d_2 = 5$  e  $d_3 = 10$ .

A área disponível para a unidade tem dimensões 142 m x 60 m, e foi discretizada formando uma malha de 1 m x 1 m.

O algoritmo foi utilizado para geração de arranjo otimizado de equipamentos para as três instâncias identificadas e também para o posicionamento dos pontos de bifurcação e cálculo do custo de tubulação no arranjo conhecido e utilizado como referência, igualmente considerando três casos (conforme as três instâncias indicadas).

### 4.2 Resultados obtidos

O algoritmo foi implementado em VBA, e todos os experimentos foram executados em um *Intel Core (TM) i7-3770* com 3,4 GHz, incluindo a alocação dos nós e cálculo do custo do arranjo de referência.

As configurações utilizadas para as três instâncias e também para cálculo do custo da solução de referência estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros utilizados

Parâmetro	Referência	Instância 1	Instância 2	Instância 3
Tamanho da população	20	20	20	20
Taxa de recombinação	1	1	1	1
Taxa de mutação	0,1	0,1	0,1	0,1
Distância mínima relativa	0,1	0,005	0,01	0,01
Número de gerações	50	50	50	50
Raio para busca local I	50	50	50	50
Raio para busca local II	50	50	50	50

A distância relativa entre as soluções indica o grau de diferenciação entre as soluções, e quando o valor calculado para essa distância relativa atinge o valor determinado como distância mínima relativa, o algoritmo executa mutações aleatórias nas soluções, conforme a taxa de mutação. A mutação aleatória também é executada quando a população de soluções permanece idêntica ao longo de duas gerações.

Os raios para busca local são os raios de atuação da busca local a partir do centroide do equipamento que está sofrendo a busca local.

Para as três instâncias consideradas o algoritmo proposto gerou soluções viáveis com custo inferior ao custo do arranjo conhecido, conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados

Instância	Distância	Custo da melhor solução obtida	Custo da solução de referência	Redução	Tempo (s)
1	0	764447	935915	18,3%	70853
2	5	622572	783864	20,6%	70269
3	10	542846	714016	24,0%	74706

Verificou-se através da entrevista com um especialista que os arranjos de equipamentos

gerados pelo algoritmo para as três instâncias (conforme Figura 2) são adequados para aplicação prática após pequenos ajustes.

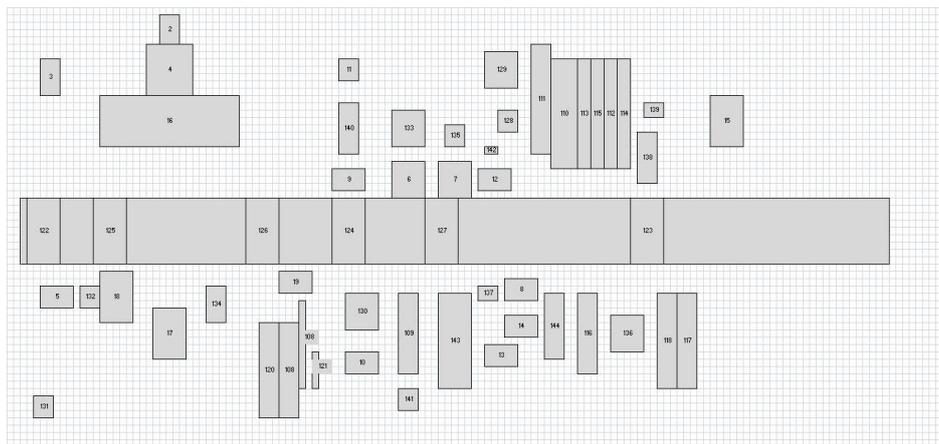


Figura 2: Representação da Solução Obtida pelo Algoritmo Proposto para a Instância 3

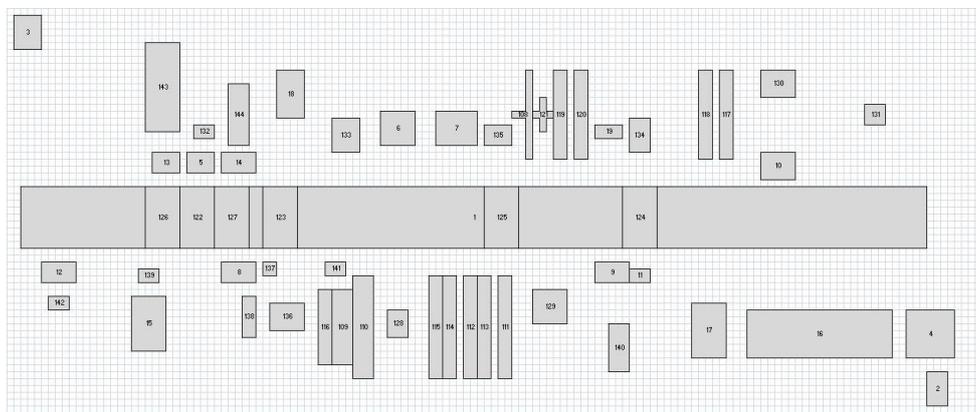


Figura 3: Representação da Solução Obtida pelo Algoritmo Proposto para a solução de referência

## 5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Concluindo, neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta computacional para otimização do arranjo físico de equipamentos de uma unidade de refino através da adaptação e de modificações do algoritmo memético proposto por Merz *et* Freisleben (1999) para adequá-lo ao problema de arranjo de equipamentos.

As reduções de custo de cerca de 20% obtidas pelos arranjos de equipamento gerados pelo algoritmo, relatadas na Seção 4.2, indicam que o algoritmo proposto é eficiente, demonstrando que a utilização de uma ferramenta de otimização no auxílio à elaboração de plantas de arranjo pode reduzir os custos de implantação de uma refinaria ou unidade de refino através da redução de custos de tubulação.

Como sugestões de trabalho futuro foram identificadas as seguintes possibilidades de desenvolvimento do algoritmo para melhora da qualidade (aplicabilidade prática) da solução obtida, melhora da eficiência do algoritmo e também uma possibilidade de trabalho complementar:

- Considerar restrições de distância entre equipamentos para minimizar efeitos da flexibilidade;
- Considerar a dimensão altura;
- Considerar custos indiretos de manutenção;

- Considerar custos indiretos de operação;
- Melhoria do algoritmo memético através de mudança no algoritmo de seleção ou utilizando a metodologia de incluir boas soluções conhecidas na população inicial para reduzir o tempo necessário pelo algoritmo para gerar melhores soluções;
- Alteração da linguagem e melhorias no algoritmo para redução do tempo de processamento e obtenção de solução final com maior qualidade;
- Desenvolvimento de algoritmo de otimização específico para o posicionamento dos “nós” de bifurcação e confluência de tubulação, assim como do encaminhamento de tubulação;

## Referências

- Bausbacher, E. e Hunt, R.** *Process Plant Layout and Piping Design*. New Jersey: P T R Prentice-Hall, 1993.
- Buffa, E.S., Armour, G.C. e Vollmann, T.E.** (1964), Allocating facilities with CRAFT. *Harvard Business Review*, 136-158.
- Gambardella, L.M., Taillard, D. e Dorigo, M.** (1999), Ant colonies for the QAP. *Journal of the Operational Research Society*, 50, 167–176.
- Hahn, P., Smith, J. M. e Zhu, Y.** (2010), The Multi-Story Space Assignment Problem. *Annals of Operations Research*, 179 (1), 77-103.
- Koopmans, T. e Beckmann, M.** (1957), Assignment Problems and the Location of Economic Activities. *Econometrica*, 25 (1), 53-76.
- Loiola, E.M., Abreu, N.M.M., Boaventura-Netto, P.O., Querido, T.M. e Hahn, P.** (2007), A survey for the quadratic assignment problem, *European Journal of Operational Research*, 176, 657-690.
- Meller, R. D. e Gau, K. Y.** (1996), The Facility Layout Problem: Recent and Emerging Trends and Perspectives. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 15, n. 5, 351-366.
- Merz, P., e Freisleben, B.** (1999), A Comparison of Memetic Algorithms, Tabu Search, and Ant Colonies for the Quadratic Assignment Problem. *Department of Electrical Engineering and Computer Science (FB 12)*. University of Siegen. Siegen, Alemanha
- Misevicius, A.** (2003), A modified simulated annealing algorithm for the quadratic assignment problem. *Informatica*, 14, 497-514.
- Misevicius, A.** (2012), An implementation of the iterated tabu search algorithm for the quadratic assignment problem. *OR Spectrum*, 34, 665-690.
- Moscato, P. e Norman, M. G.** (1992), A Memetic Approach for the Traveling Salesman Problem Implementation of a Computational Ecology for Combinatorial Optimization on Message-Passing Systems. *Parallel Computing and Transputer Applications*, (M. Valero, E. Onate, M. Jane, J. L. Larriba, and B. Suarez, eds.), 177-186.
- Persson, L.G. e Dos Santos, F.B.** (2009), Methodology of Pipe and Equipment Layout for On-Shore Oil; Gas Industry. In *10th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PROCESS SYSTEMS ENGINEERING*.
- Pessoa, A.A., Hahn, P.M., Guignard, M. e Zhu, Y.** (2010), Algorithms for the generalized quadratic assignment problem combining Lagrangean decomposition and the Reformulation-Linearization Technique. *European Journal of Operational Research*, 206, 54–63.
- PETROBRAS.**, Plano de Negócios 2009-2013, 2009 (www.petrobras.com.br), 02, 2012.
- Reddy, S. N., Varaprasad, V. e Veeranna, V.** (2012), Optimization of multi-objective facility layout using non-traditional optimization technique. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2 (10), 498-508.
- Rezende, S.O.** *Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações*, Ed. Manole, São Paulo, 2003.

**Sahni, S.; Gonzalez, T.** (1976), P-Complete Aproximation Problems, *Journal of the ACM* 23, 555-565.

**Sanusi, H. A., Zubair, A., e Oladele, R. O.** (2011), Comparative Assessment of Genetic and Memetic Algorithms. *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, 206, 54–63.

**Singh, S. P. e Sharma, R. R. K.** (2006), A review of different approaches to the facility layout problems. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30, 425–433.

**Takayassu, C. R.** *Determinação de arranjo físico de uma refinaria usando algoritmos genéticos para o caso com facilidades de tamanhos desiguais*. Dissertação de Mestrado. UFRJ. Rio de Janeiro, RJ. 2010.

**Telles, P.C.S.** *Tubulações industriais*. 10 ed. Rio de Janeiro: LTC, Rio de Janeiro, 2005