

OTIMIZAÇÃO DO ARRANJO FÍSICO DE EQUIPAMENTOS E MÓDULOS DA
PLANTA DE PROCESSO DE UM *FPSO*

Marcus Vinicius de Souza

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio
de Janeiro, como parte dos requisitos necessários
à obtenção do título de Mestre em Engenharia
Civil.

Orientadores: Beatriz de Souza Leite Pires Lima
Juliana Souza Baioco

Rio de Janeiro
Março de 2019

OTIMIZAÇÃO DO ARRANJO FÍSICO DE EQUIPAMENTOS E MÓDULOS DA
PLANTA DE PROCESSO DE UM *FPSO*

Marcus Vinicius de Souza

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof^ª. Beatriz de Souza Leite Pires Lima, D.Sc.

Prof^ª. Juliana Souza Baioco, D.Sc.

Prof^ª. Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, D.Sc.

Dr. Max de Castro Rodrigues, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2019

Souza, Marcus Vinicius de

Otimização do Arranjo Físico de Equipamentos e Módulos da Planta de Processo de um *FPSO*/Marcus Vinicius de Souza. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XV, 99 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Beatriz de Souza Leite Pires Lima

Juliana Souza Baioco.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 82-87.

1. Otimização. 2. Arranjo físico de *FPSOs*. 3. Modelos de PIM. I. Souza, Marcus Vinicius de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*Educação não transforma o mundo. Educação muda as pessoas. Pessoas transformam
o mundo.*

Paulo Freire

Agradecimentos

À minha família, em especial minha esposa Raquel Hunger, pelo apoio incondicional e por ter me dado força e ânimo para o desenvolvimento deste trabalho.

Às professoras Beatriz de Souza Leite Pires Lima e Juliana Souza Baioco, pela paciência, compreensão, estímulo e ensinamentos transmitidos ao longo deste trabalho.

À professora Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, por todo o apoio dado para o desenvolvimento deste trabalho.

À Petrobras, pela oportunidade e incentivo à realização do meu Mestrado: aos gerentes José Império Meyrelles e Juventino Ribeiro Barros e aos colegas de trabalho da ESUP (Engenharia de Sistemas de Superfície), que forneceram apoio valioso para o desenvolvimento deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

OTIMIZAÇÃO DO ARRANJO FÍSICO DE EQUIPAMENTOS E MÓDULOS DA PLANTA DE PROCESSO DE UM *FPSO*

Marcus Vinicius de Souza

Março/2019

Orientadores: Beatriz de Souza Leite Pires Lima

Juliana Souza Baioco

Programa: Engenharia Civil

Uma abordagem computacional é apresentada para o problema de otimização do arranjo físico da planta de processo de um *FPSO*, visando obter menor gasto de capital, bem como atender a requisitos de operabilidade, manutenibilidade e segurança. A abordagem compreende três etapas: dividir a planta em módulos, otimizar o arranjo físico dos equipamentos dentro de cada módulo e otimizar o arranjo físico dos módulos. Para algumas dessas etapas, modelos de programação inteira mista (PIM) são apresentados e implementados usando dados reais de *FPSOs*, como estudos de caso. Os modelos de otimização apresentaram bons resultados e os *layouts* obtidos apresentaram custos menores em relação aos *layouts* adotados nos *FPSOs*.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PROCESS PLANT EQUIPMENT AND MODULES LAYOUT OPTIMIZATION OF
AN FPSO

Marcus Vinicius de Souza

March/2019

Advisors: Beatriz de Souza Leite Pires Lima

Juliana Souza Baioco

Department: Civil Engineering

A computational approach is presented to the problem of process plant layout optimization of an FPSO, aiming to obtain lower capital expenditure as well as comply with operability, maintainability and safety requirements. This approach comprises three stages: divide the plant into modules, optimization of the layout of equipment within each module and optimization of the layout of modules. For some of these stages, mixed integer linear programming (MILP) models are presented and implemented using real data from FPSOs, as case studies. The optimization models showed good results and the obtained layouts presented lower costs compared to the layouts adopted in the FPSOs.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
NOMENCLATURA	xiii
SIGLAS	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Estrutura do Trabalho	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Introdução	4
2.2 Problemas de <i>Layout</i>	5
2.2.1 Definição	5
2.2.2 Classificação dos problemas de <i>layout</i>	6
2.3 Otimização do <i>Layout</i> de Plantas de Processo	13
2.3.1 Otimização do posicionamento de equipamentos	14
2.3.2 Otimização do posicionamento de módulos	19
3 SISTEMAS DE PRODUÇÃO OFFSHORE	20
3.1 Processamento Primário de Petróleo	20
3.2 Unidade Estacionária de Produção	21
3.2.1 Fixa	22
3.2.2 Semisubmersível	23
3.2.3 <i>FPSO (Floating Production Storage and Offloading)</i>	23
3.3 Planta de Processo de uma UEP	24
3.3.1 Sistemas de separação	25
3.3.2 Processamento do óleo	27
3.3.3 Processamento da água	28
3.3.4 Processamento do gás	29
3.4 Arranjo da Planta de Processo de uma UEP	30
4 METODOLOGIA	34
4.1 Concepção do Arranjo Físico da Planta de Processo de um <i>FPSO</i>	34
4.2 Abordagem Computacional	35
4.3 Modelo Matemático	39
4.4 Métodos de Resolução	39
4.5 <i>Softwares</i>	45

5	OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS.....	46
5.1	Modelo Proposto	46
5.1.1	Função Objetivo.....	47
5.1.2	Restrições.....	49
5.2	Estudo de Caso	54
5.3	Resultados.....	60
5.4	Discussão	63
6	OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE MÓDULOS	65
6.1	Modelo Proposto	65
6.1.1	Função Objetivo.....	65
6.1.2	Restrições.....	66
6.2	Estudo de Caso	69
6.3	Parâmetro α	72
6.4	Resultados.....	72
6.5	Discussão	78
7	CONCLUSÕES.....	79
7.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	80
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
9	ANEXOS	88
9.1	Modelo de Otimização do Posicionamento de Equipamentos	88
9.2	Modelo de Otimização do Posicionamento de Módulos	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Classificação dos problemas de layout.	7
Figura 2.2 - Formato das facilidades.	9
Figura 2.3 - Problemas de layout quanto ao manuseio de material.....	10
Figura 2.4 - Exemplo de layout em múltiplos pisos.	11
Figura 3.1 - Esquema do processamento primário de petróleo.	21
Figura 3.2 - Plataforma fixa de Mexilhão operando na Bacia de Santos.	22
Figura 3.3 - Plataforma semissubmersível P-55 operando no campo de Roncador, Bacia de Campos.	23
Figura 3.4 - FPSO P-63 opera no campo de Papa-Terra, no sul da Bacia de Campos... 24	
Figura 3.5 - Exemplo de Unidade Estacionária de Produção (UEP) do tipo FPSO e sua planta de processo.....	25
Figura 3.6 - Esquema de um sistema de separação com separador trifásico.....	26
Figura 3.7 - Exemplo de separador trifásico.....	26
Figura 3.8 - Exemplo de tratador de óleo.	28
Figura 3.9 - Exemplo de flotador a gás.	29
Figura 3.10 - Skid de remoção de CO ₂	30
Figura 3.11 - Exemplo de Arranjo Geral da Planta de processamento de uma UEP.	32
Figura 3.12 - (a) Modelo tridimensional (renderizado) da UEP vs (b) UEP real.....	33
Figura 4.1 – Desenvolvimento do arranjo preliminar de um FPSO.	34
Figura 4.2 - Exemplo de planta de arranjo de um módulo.	37
Figura 4.3 - Linhas de processo que interligam os módulos.	37
Figura 4.4 - Linhas de utilidades que interligam os módulos.....	38
Figura 4.5 - Linhas do sistema de alívio que interligam os módulos.	38
Figura 4.6 - Exemplo de árvore de busca.	41
Figura 5.1 - Possíveis rotações e reflexões no plano x-y.....	47
Figura 5.2 - Fluxograma de processo do módulo M-10 - Oil Processing and Water Treatment da P-76.	54
Figura 5.3 - Pequeno módulo formado pelo equipamento Oil Dehydrator Recirculation Water Pump.	56
Figura 5.4 - Resultado da otimização do layout de equipamentos (vista de planta).	62
Figura 5.5 - Resultado da otimização do layout de equipamentos (vista isométrica). ...	63

Figura 6.1 – Resultados da otimização do posicionamento de módulos.	77
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resumo dos trabalhos desenvolvidos para o problema de otimização do posicionamento de equipamentos.....	18
Tabela 4.1 - Exemplo de módulos de um FPSO.	36
Tabela 5.1 - Dimensões e peso dos equipamentos.	55
Tabela 5.2 - Posição relativa dos bocais.....	57
Tabela 5.3 - Dados das tubulações para a otimização do layout.	58
Tabela 5.4 - Dados de custo unitário para os suportes para a otimização do layout.	58
Tabela 5.5 – Dimensões do modulo e custo de ocupação de área.....	60
Tabela 5.6 – Posição e custo dos suportes dos componentes.	60
Tabela 5.7 - Comprimento e custo das tubulações (utilizando a distancia de Manhattan).	61
Tabela 5.8 - Comparação do layout obtido pelo modelo de otimização com o layout de equipamentos adotado no M-10 da P-76.	64
Tabela 6.1 - Dimensões dos módulos.....	70
Tabela 6.2 - Soma dos custos das tubulações, em \$/m, que interligam os módulos.	71
Tabela 6.3 - Posição do centro do módulo m na fileira r, $\alpha = 1,00$	73
Tabela 6.4 - Posição do centro do módulo m na fileira r, $\alpha = 0,75$	74
Tabela 6.5 - Posição do centro do módulo m na fileira r, $\alpha = 0,50$	74
Tabela 6.6 - Posição do centro do módulo m na fileira r, $\alpha = 0,25$	75
Tabela 6.7 - Posição do centro do módulo m na fileira r, $\alpha = 0,00$	75
Tabela 6.8 - Resultados da otimização do posicionamento de módulos.	76
Tabela 6.9 – Comparação dos layouts obtidos pelo modelo de otimização com o layout de módulos adotado na P-75.....	78

NOMENCLATURA

a_i, b_i, c_i	dimensões para o equipamento i
A_m, B_m	dimensões para o módulo m
$A_r^{fileira}$	área da fileira r
A^{total}	área total do <i>layout</i> de módulos
c_i^s	custo de suportes para o equipamento i
C^{area}	custo por unidade de área
C_k^p	custo por unidade de comprimento para a tubulação k
$C_{m,n}^p$	custo por unidade de comprimento para as tubulações que interligam os módulos m e n
C_{is}^{sa}, C_{is}^{sb}	fatores de custo unitário para os suportes do equipamento i
C^{total}	comprimento total do <i>layout</i> de módulos
$d_{ij}^x, d_{ij}^y, d_{ij}^z$	distância de Manhattan entre os centros dos equipamentos i e j
D	distância mínima entre módulos (na direção x)
D^h	distância mínima horizontal entre equipamentos
D^v	distância mínima vertical entre equipamentos
E_i^e	elevação mínima vertical do equipamento i
F_p^x, F_p^y, F_p^z	posição relativa do bocal p
H	altura entre pisos
$i(p)$	equipamento i ao qual o bocal p está associado
$k^o(k)$	bocal de origem da tubulação k
$k^d(k)$	bocal de destino da tubulação k
$l_k^{x+}, l_k^{x-}, l_k^{y+}, l_k^{y-}, l_k^{z+}, l_k^{z-}$	comprimento da tubulação k (usando a distância de Manhattan) nas direções x , y e z
l_k	comprimento total da tubulação k (usando a distância de Manhattan)
l	variável binária, assume um (zero) se a fileira superior (inferior) tiver o maior comprimento
L	largura do corredor
M	um número grande
N^{cp}	número de equipamentos

N^{md}	número de módulos
N^{nz}	número de bocais
N^{pi}	número de tubulações
$Peso_i$	peso total para o equipamento i
q_{mn}	variável binária, tal que $q_{mn} = 1$ se os módulos m e n estão na mesma fileira e $q_{mn} = 0$, caso contrário
R	número de fileiras ($R = 2$)
v_{mn}^+, v_{mn}^-	distância entre os módulos m e n (na direção x)
w_{il}	variável inteira para a rotação do equipamento i
$w_{ij}^x, w_{ij}^y, w_{ij}^z$	variáveis inteiras para a posição relativa entre os equipamentos i e j
X, Y, Z	dimensões do módulo
x_i, y_i, z_i	posição do centro do equipamento i (exceto z_i , que é a posição da base do equipamento i)
x_p^n, y_p^n, z_p^n	posição do bocal p
$X_{m,r}$	posição do centro do módulo m na fileira r
$Y_{m,r}$	variável binária, tal que $Y_{m,r} = 1$ se o módulo m está a fileira r e $Y_{m,r} = 0$, caso contrário
$Z_{r,m,n}$	variável binária, tal que $Z_{r,m,n} = 1$ se o módulo m está a esquerda do módulo n na fileira r e $Z_{r,m,n} = 0$, caso contrário
i	indexador para os equipamentos ($i = 1, \dots, N^{cp}$)
j	indexador para os equipamentos ($j = 1, \dots, N^{cp}$)
k	indexador para as tubulações ($k = 1, \dots, N^{pi}$)
l	indexador para as rotações ($l = 1, \dots, 8$)
m	indexador para os módulos ($m = 1, \dots, N^{md}$)
n	indexador para os módulos ($n = 1, \dots, N^{md}$)
p	indexador para os bocais ($p = 1, \dots, N^{nz}$)
r	indexador para as fileiras ($r = 1, 2$)
s	indexador para o custo dos suportes ($s = 1, \dots, 4$)

SIGLAS

<i>DRLP</i>	<i>Double Row Layout Problems</i>
<i>FLP</i>	<i>Facility Layout Problem</i>
<i>FPSO</i>	<i>Floating Production Storage and Offloading</i>
<i>MILP</i>	<i>Mixed Integer Linear Problem</i>
<i>MINLP</i>	<i>Mixed Integer Non-Linear Problem</i>
<i>QAP</i>	<i>Quadratic Assignment Problem</i>
PIM	Programação Inteira Mista
UEP	Unidade Estacionária de Produção

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

No projeto do arranjo físico de uma planta de processo, estudo de *layout*, são importantes tanto os aspectos de segurança, operação e manutenção, quanto o aspecto econômico. A importância de se otimizar o *layout*, considerando esse aspecto, pode ser entendida ao considerar que o custo de tubulações em uma planta de processo pode atingir 80% do custo de equipamentos ou 20% do capital fixo investido (PETERS; TIMMERHAUS, 1991, apud GUIRARDELLO; SWANEY, 2005). Embora essas decisões sejam usualmente ignoradas ou não recebam atenção apropriada durante o projeto, é evidente que decisões de *layout* tomadas durante a fase de projeto podem ter influência no custo total de uma planta de processo. Deste modo, a otimização de custos não pode ser negligenciada, ao mesmo tempo em que os requisitos de segurança, operação e manutenção devem ser atendidos.

Além disso, as decisões tomadas nas fases iniciais de um projeto têm grande influência nos seus resultados, apesar do pequeno percentual de investimento alocado. Já nas fases subsequentes, o grau de influência é reduzido, enquanto que o nível de investimento se eleva (PETROBRAS, 2015). Deste modo, e considerando o aumento da competitividade, cada vez mais são necessários estudos para escolha das melhores alternativas de *layout* durante as primeiras fases do projeto. A postergação de decisões e a introdução de modificações relevantes nas fases mais avançadas implicarão em altos custos e numa menor flexibilidade para atuação nas suas consequências.

Diante do exposto, a grande motivação deste trabalho é introduzir uma ferramenta de projeto capaz de auxiliar o projetista na obtenção de um arranjo físico otimizado da planta de processo de um *FPSO* (*Floating Production Storage and Offloading*) a ser aplicada nas fases iniciais do projeto.

1.2 Objetivos

Tendo em mente a motivação apresentada no item 1.1, o objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma abordagem computacional para o problema de otimização do arranjo físico da planta de processo de um *FPSO*, visando menor custo de capital e atendendo a requisitos de operabilidade, manutenibilidade e segurança.

Além disso, são objetivos específicos deste trabalho:

- Fazer uma revisão bibliográfica dos principais estudos relacionados ao problema de otimização do arranjo físico de plantas de processo;
- Propor adaptações de modelos matemáticos existentes na literatura para a otimização do arranjo físico da planta de processo de um *FPSO*;
- Implementar os modelos matemáticos através de modelos de programação inteira mista utilizando dados reais de *FPSOs*, como um estudo de caso; e
- Comparar os resultados obtidos pelos modelos de programação inteira mista com os arranjos adotados nos *FPSOs*.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente capítulo tem caráter introdutório, apresentando a motivação, os objetivos e a forma como o trabalho está estruturado.

No segundo capítulo, é feita uma revisão bibliográfica sobre os problemas de *layout*, apresentando sua definição, tipos e classificações. Também são apresentados nesse capítulo modelos matemáticos para a otimização do arranjo físico de plantas de processo.

No terceiro capítulo, é apresentado todo contexto de sistemas de produção *offshore*, no qual são apresentados os tipos de UEPs (Unidades Estacionárias de Produção), a sua planta de processo e as orientações para elaboração do seu arranjo.

No quarto capítulo, é apresentada a metodologia para o problema otimização do arranjo físico da planta de processo de um *FPSO* adotada neste trabalho. Também são apresentados conceitos de modelos de programação inteira mista, métodos de resolução e *softwares* aplicáveis.

O quinto capítulo é dedicado à apresentação do modelo de otimização do posicionamento de equipamentos no interior de um módulo da planta de processo de um *FPSO*. Também é apresentado um estudo de caso utilizando dados reais de um módulo *FPSO*: os resultados obtidos foram comparados com o *layout* de equipamentos adotado neste módulo.

O sexto capítulo é dedicado à apresentação do modelo de otimização do posicionamento de módulos da planta de processo de um *FPSO*. Também é apresentado um estudo de caso utilizando dados reais de um *FPSO*: os resultados obtidos foram comparados com o *layout* de módulos adotado neste *FPSO*.

No sétimo capítulo são apresentadas a conclusão e as sugestões para trabalhos futuros.

No oitavo capítulo são apresentadas as referências bibliográficas.

No nono e último capítulo são apresentados os anexos do trabalho. No anexo 1 é apresentada a implementação do modelo de otimização do posicionamento de equipamentos no interior de um módulo da planta de processo de um *FPSO*. E, no anexo 2 é apresentada a implementação do modelo de otimização do posicionamento de módulos da planta de processo de um *FPSO*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Com o desenvolvimento industrial, 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 (ALMEIDA, 2008). Para operar sistemas de produção e serviços de forma eficiente, as empresas devem se preocupar não apenas com planejamento otimizado e políticas operacionais, mas também que o arranjo físico de suas instalações seja bem projetado (PILLAI et al., 2011).

De acordo com Drummond (2004), projetar o arranjo físico significa tomar decisões sobre a forma como os equipamentos serão dispostos numa instalação ou planta industrial. Para isso, as atividades devem ser desenvolvidas de 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*.

Um *layout* eficaz aumenta o rendimento, a produtividade e a eficiência. Em contrapartida, um *layout* deficiente resulta em maior tempo de trabalho e no processo de fabricação (VITAYASAK et al., 2017). Isso pode ser percebido visto que 20% a 50% dos custos operacionais totais de uma empresa de manufatura e 15% a 70% do custo total de fabricação de um produto são atribuídos ao custo de transporte de materiais (EMAMI; NOOKABADI, 2013). De acordo com Pillai et al. (2011) as empresas podem reduzir esses custos em pelo menos 10% a 30% e melhorar sua produtividade se suas instalações são organizadas de forma eficaz. Por outro lado, de acordo com Ripon et al. (2013), um layout ineficaz pode adicionar até 36% ao custo de transporte de materiais.

Segundo Mecklenburgh (1985, apud DRUMMOND, 2004), um *layout* eficaz traz benefícios como:

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

Deste modo, o planejamento do *layout* de instalações é recomendável a qualquer empresa, grande ou pequena. Com um bom *layout*, obtêm-se resultados surpreendentes na redução de custos e no aumento de produtividade, sendo imprescindível para novos empreendimentos.

2.2 Problemas de *Layout*

O problema de *layout*, conhecido como *Facility Layout Problem (FLP)* é de grande importância na indústria para o posicionamento de facilidades, unidades de processo e máquinas, atraindo a atenção de muitos pesquisadores. Uma primeira abordagem para o problema de *layout* foi dada por engenheiros industriais que tentavam determinar os ótimos locais das facilidades, de modo a minimizar os custos totais de conexão (XU; PAPAGEORGIOU, 2009). Na literatura, os primeiros problemas de *layout*, relacionado a atividades econômicas, foram formulados por Koopmans e Beckmann (1957) e tratavam de otimizar arranjos de m departamentos de tamanhos iguais em n espaços de tamanhos iguais, disponíveis em um pavimento, introduzindo o conceito de *Quadratic Assignment Problems (QAP)*.

2.2.1 Definição

Devido à variedade de considerações encontradas nos artigos, pesquisadores não chegaram a um consenso sobre a definição de problema de *layout*. Koopmans e Beckmann (1957) estiveram entre os primeiros a considerar esta classe de problemas, e eles definiram problema de *layout* como sendo um problema industrial em que o objetivo é configurar facilidades, de modo a minimizar o custo de transporte de

materiais entre essas facilidades. Meller et al. (1998) consideram que o problema de *layout* de uma instalação consiste na busca de um arranjo ortogonal plano não sobreposto de n instalações retangulares dentro de uma determinada área plana e retangular, de modo a minimizar a distância entre as instalações. Lee e Lee (2002) consideram que o problema de *layout* de uma instalação consiste em arranjar n facilidades de diferentes tamanhos em um dado espaço, que pode ser delimitado ao comprimento ou largura do *site* de forma a minimizar o custo total de transporte de materiais e o custo de utilização da área. Já Hosseini-Nasab et al. (2018) definiram problema de *layout* como sendo um problema de alocação de facilidades em uma dada instalação, com o objetivo de determinar o arranjo mais eficaz de acordo com alguns critérios, ou objetivos sob certas restrições, como forma, tamanho, orientação das facilidades.

2.2.2 Classificação dos problemas de *layout*

Na literatura são encontradas diversas formas de se classificar os problemas de *layout*. A Figura 2.1, produzida a partir do estudo dos problemas de *layout* feito por Drira et al. (2007), sintetiza esta classificação.

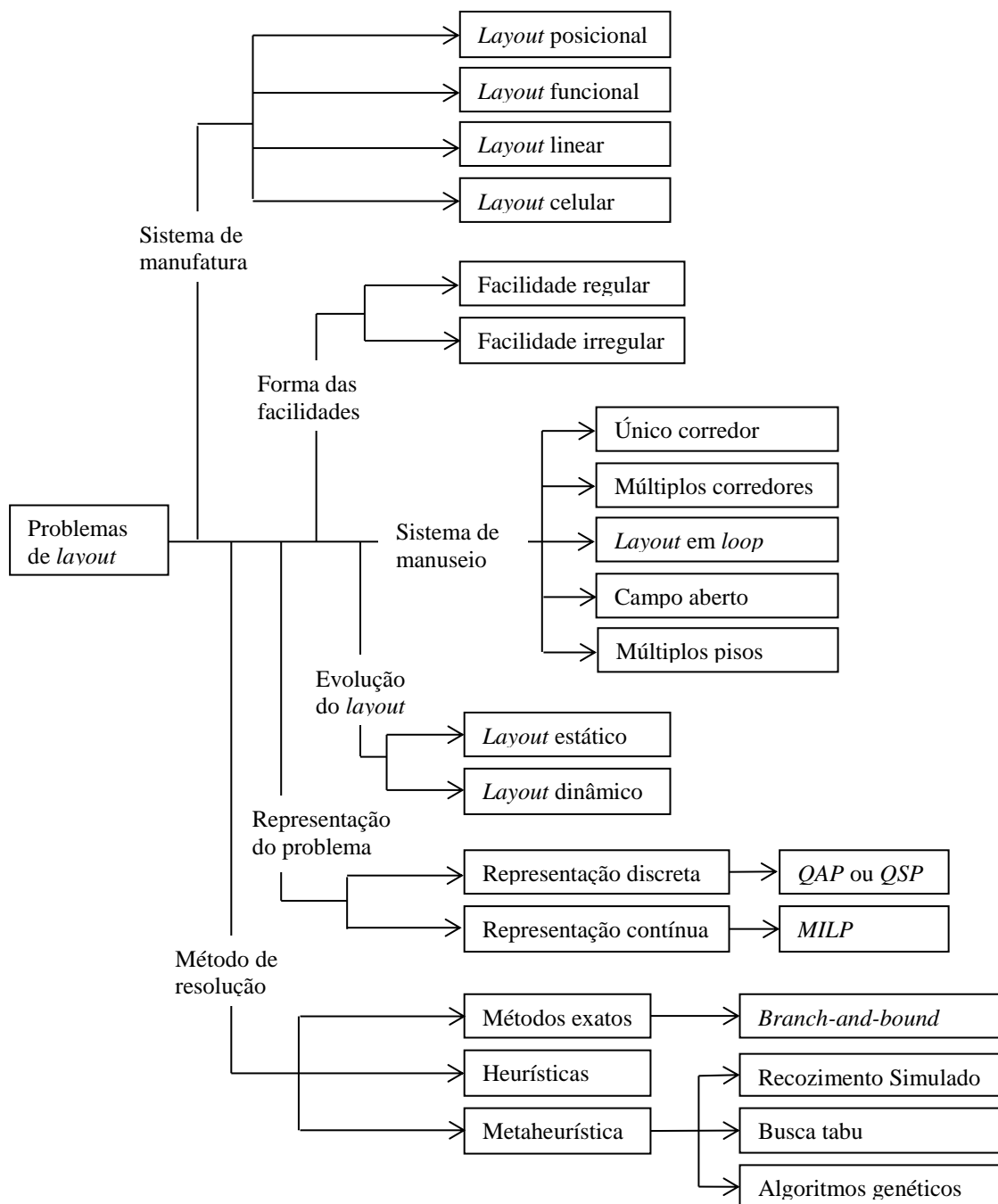


Figura 2.1 - Classificação dos problemas de *layout*.

Fonte: modificado de Drira et al., 2007.

A seguir, são apresentadas as principais características dessas classificações para os problemas de *layout*.

Sistema de manufatura

A concepção de um *layout* geralmente depende da variedade de produtos e dos volumes de produção. Segundo Drira et al. (2007), os problemas *layouts* são usualmente divididos em quatros tipos básicos quanto ao sistema de manufatura:

- **Layout posicional (ou fixo):** as necessidades dos recursos transformados prevalecem sobre os recursos transformadores. O *layout* posicional é usado para montagens complexas. O material ou os componentes principais ficam em um lugar fixo e os recursos, como pessoas, matérias, máquinas são trazidas para o local em que as operações de fabricação serão realizadas. Este tipo de *layout* é comumente encontrado em indústrias que fabricam produtos de grande porte, como navios ou aeronaves;
- **Layout funcional (ou por processo):** as necessidades dos recursos transformadores prevalecem sobre os recursos transformados. É o tipo de *layout* mais encontrado na indústria. No *layout* por processo as máquinas são agrupadas em seções de modo a realizar operações análogas, em um mesmo local e os materiais movem-se através dessas seções especializadas. Esta organização é frequentemente relatada como adequada quando há uma grande variedade de produtos. São exemplos de indústrias que utilizam preferencialmente o *layout* funcional as indústrias de sapatos e têxteis ou de roupas;
- **Layout linear (ou por produto):** consiste em posicionar recursos transformadores de acordo com a conveniência dos recursos transformados. Não há movimentação dos recursos transformadores. As máquinas são arranjadas de acordo com a sequência de operações a se realizarem. O material move-se enquanto as máquinas permanecem fixas. O *layout* por produto é usado para sistemas com altos volumes de produção e uma baixa variedade de produtos. O *layout* linear é normalmente encontrado em linhas de montagem como em indústrias automotivas; e
- **Layout celular:** os recursos transformados são selecionados para se movimentarem de acordo com o que for mais conveniente para atender suas necessidades imediatas. No *layout* celular, as máquinas são agrupadas em células, para processar famílias de partes similares. O *layout* celular se preocupa em encontrar o melhor arranjo de máquinas em cada célula bem como em encontrar o melhor arranjo das células dentro de um *site*. Em plataformas de

petróleo, é muito comum o agrupamento de equipamentos de um mesmo sistema ou de um mesmo grupo de sistemas em módulos específicos, apresentando fortes características de um *layout* celular.

Na prática, as empresas, normalmente, utilizam *layouts* mistos em suas instalações, sendo rara a ocorrência de apenas um tipo de *layout* em toda organização.

Forma das facilidades

Os problemas de *layout* podem ser classificados quanto à forma das facilidades, podendo ser: regular, geralmente retangular, e irregular, geralmente polígonos contendo pelo menos um ângulo de 270° . Problemas de *layout* com facilidades irregulares não são muito encontrados na literatura.



Facilidade regular.



Facilidade irregular.

Figura 2.2 - Formato das facilidades.

Fonte: Drira et al., 2007.

Sistema de manuseio de materiais

O problema de *layout* quanto ao sistema de manuseio de materiais consiste em organizar instalações ao longo de um caminho o qual os materiais são manipulados, ou seja, o fluxo de processo. As principais configurações de *layout* quanto ao sistema de manuseio de materiais são apresentados na Figura 2.3.

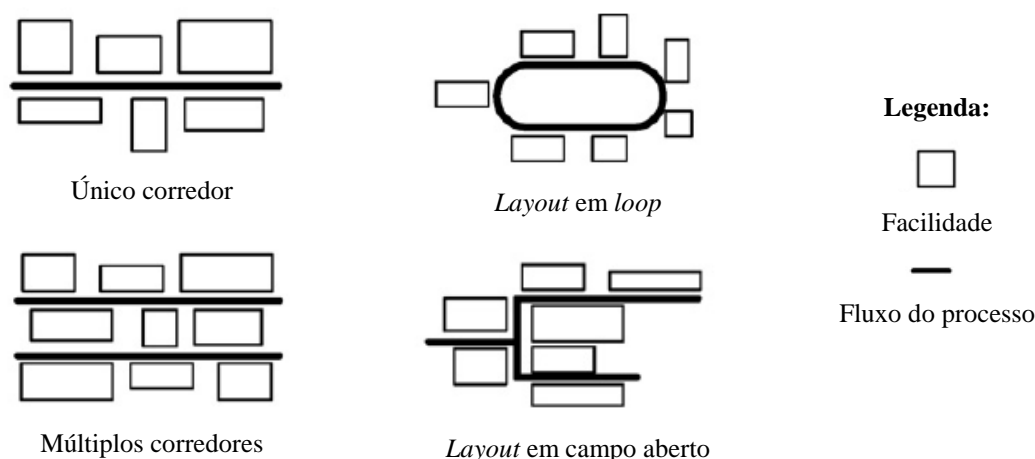


Figura 2.3 - Problemas de *layout* quanto ao manuseio de material.

Fonte: Drira et al., 2007.

O problema de *layout* em corredor único ocorre quando as facilidades têm que ser posicionadas ao longo de uma linha. No problema em múltiplos corredores, as facilidades passam a ser organizadas de maneira paralela obedecendo à orientação de *n*-corredores. Os movimentos de peças ocorrem entre instalações da mesma linha e de diferentes linhas. No *layout* em *loop*, as facilidades são dispostas de maneira sequencial em um *loop* fechado e os produtos são transportados em um único sentido. O *layout* em *loop* incorpora uma estação de carga e descarga, ou seja, local a partir do qual uma parte entra e sai do *loop*. No *layout* em campo aberto, as instalações podem ser alocadas sem restrições ou sem as restrições que seriam introduzidas pelos arranjos apresentados anteriormente.

O elevado custo de terra bem como a insuficiência deste recurso, geralmente, leva a necessidade do uso de estruturas de múltiplos pisos no *layout* de uma instalação (AHMADI; PISHVAEE; JOKAR, 2017). Devido à limitação de espaço horizontal, pode ser relevante fazer um *layout* em múltiplos pisos. Neste conceito de *layout*, os materiais podem se mover tanto horizontalmente em um determinado piso (direção de fluxo horizontal), quanto de um piso para outro (direção de fluxo vertical). Neste contexto, os problemas de *layout* em múltiplos pisos se propõem em determinar o número de pisos, as elevações dos pisos e a posição das facilidades em cada piso. A concepção de um *layout* em múltiplos pisos é muito comum em plataformas de petróleo em função da limitada área de *topsides*. A Figura 2.4 apresenta um exemplo de *layout* em múltiplos pisos.

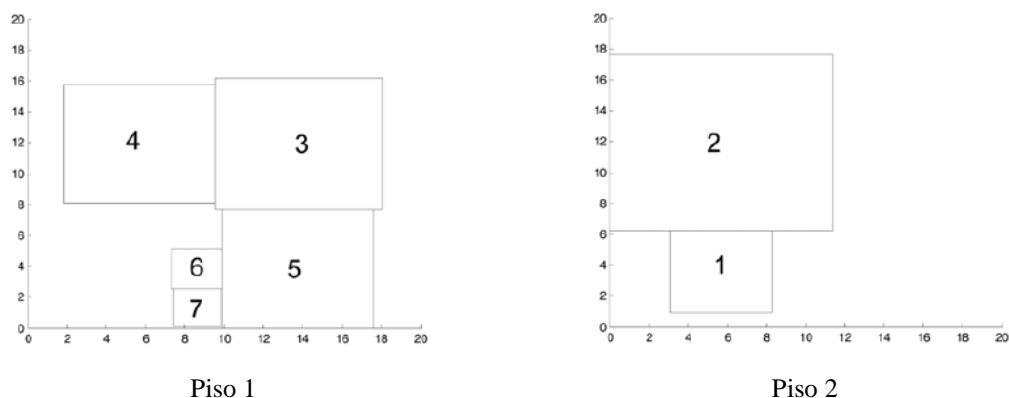


Figura 2.4 - Exemplo de *layout* em múltiplos pisos.

Fonte: Park et al., 2011.

Evolução do *layout*

A maioria dos trabalhos que lidam com problemas de *layout* são implicitamente considerados como estáticos, ou seja, eles assumem que os dados sobre a produção e o que estão destinados a produzir permanecerão constantes durante um longo período de tempo. De acordo com Takayassu (2010), isso gera um *layout* com baixa flexibilidade das facilidades, alta especialização e baixo custo unitário o que justifica o posicionamento fixo dos recursos produtivos. A mudança de posicionamento de facilidades é algo dispendioso, incômodo que por vezes incorrem em despesas. Contudo, há mudanças de mercado e legais que forçam a reconfiguração do *layout*, seja para modernização de seus processos, seja para construção de novas facilidades no decorrer da vida útil da instalação. Em função disso, pesquisadores apresentaram a idéia de problemas de *layout* dinâmico. Este tipo de problema leva em consideração possíveis mudanças no fluxo do processo ao longo do horizonte de planejamento geralmente dividido em períodos que podem ser definidos em semanas, meses ou anos. O problema de *layout* dinâmico tem como objetivo determinar um *layout* para cada período no horizonte de planejamento, minimizando a soma dos custos de *layout*, para todos os períodos e a soma dos custos de rearranjo entre os períodos de tempo.

Em Unidades Estacionárias de Produção (UEP), as instalações de processo são, normalmente, projetadas para os valores máximos (ou mais restritivos) dos dados dos campos produtores ao longo de sua vida útil. Desta forma, o projeto de uma UEP leva a um *layout* predominantemente estático, não sendo esperadas grandes mudanças na planta de processo durante a sua vida útil.

Formulação do problema

Existem várias maneiras de formular matematicamente os problemas de *layout*. De maneira geral, um problema de *layout* pode ser formulado com representação de domínio discreta ou contínua. Na representação de domínio discreta, o problema de *layout* é, muitas vezes, abordado como um *QAP* (DRIRA et al., 2007). Nestes o *site* é dividido em blocos retangulares com a mesma área e forma, sendo cada facilidade atribuída a um bloco diferente. Se as facilidades possuírem áreas desiguais, elas podem ocupar diferentes blocos. Problemas com representação de domínio discreta não são capazes de modelar restrições específicas como a posição dos bocais de equipamentos. Ainda de acordo com Drira et al. (2007), na representação de domínio contínua, o problema de *layout* é, muitas vezes, abordado como um modelo *MILP* (sigla, em inglês, para programação linear inteira mista ou, simplesmente, programação inteira mista, em português). As instalações são alocadas em qualquer posição dentro do *site*, mas não devem se sobrepor. A representação de domínio contínua é mais adequada para a modelagem de restrições de posição dos bocais de equipamentos.

Método de resolução

Os métodos são geralmente baseados em abordagens exatas, heurísticas, metaheurísticas ou de simulação. Conforme comentado anteriormente, a formulação do problema pode influenciar a seleção da abordagem de resolução. Os métodos exatos buscam perfeitamente o espaço de solução e, portanto, a solução final da otimização pode ser garantida; enquanto os outros não consideram todo o espaço da solução e, portanto, podem cair em soluções locais. Apesar disso, de acordo com Liu (2004) os métodos exatos são capazes de lidar com problemas de tamanho muito pequeno (menos de 10 facilidades), enquanto que os casos da vida real incluem uma grande quantidade de instalações (por exemplo, 30-40 facilidades). Entretanto, é comum a decomposição de um problema maior em subproblemas menores, mais simples de se lidarem, utilizando uma abordagem exata para a solução de cada um dos subproblemas. Os métodos exatos mais comuns encontrados na literatura são baseados em *branch-and-bound* (DRIRA et al., 2007). Há ainda autores que utilizam abordagens heurísticas e metaheurísticas para a resolução de problemas de *layout* de grande porte. Entre as metaheurísticas, as abordagens mais utilizadas são: algoritmo genético, recozimento simulado e busca tabu (DRIRA et al., 2007).

2.3 Otimização do *Layout* de Plantas de Processo

O estudo da disposição geral das áreas e equipamentos em um determinado *site*, estudo de *layout*, de uma planta de processo é uma das etapas mais importantes e decisivas do projeto global. É obrigatoriamente um trabalho em equipe, entregue sempre a pessoas categorizadas, de grande experiência, de diversas especialidades, e geralmente coordenado pelo especialista de tubulações. Desse estudo dependerão primordialmente a eficiência da instalação, o seu custo inicial e suas condições econômicas de funcionamento, bem como suas condições de segurança e sua maior ou menor facilidade de operação e manutenção (TELLES, 2001).

Apesar de sua grande importância, o estudo do *layout* de plantas de processo é uma atividade amplamente realizada por projetista humano, existindo poucos métodos para a sua otimização. Ao elaborar o *layout* de uma planta de processo, o projetista humano busca minimizar os custos relacionados ao *layout*, como a área ocupada pela planta de processo e o custo das tubulações que interligam os equipamentos, e, ao mesmo tempo, satisfazer uma série de restrições, como manter distâncias mínimas entre os equipamentos para fins de operação, manutenção e segurança.

Modelos matemáticos podem ser usados para se obter um *layout* de processo mais econômico, sujeito a restrições que possibilitem a operação, manutenção e segurança (GUIRARDELLO; SWANEY, 2005). Deste modo, todos os modelos objetivam minimizar o custo total, desde que satisfaçam as restrições de espaço livre ao redor dos equipamentos.

Segundo Guirardello e Swaney (2005), pode-se realizar a otimização do *layout* de uma planta de processo em três etapas:

- 1) Dividir a planta em módulos: consiste no agrupamento dos equipamentos que possuem maior número de conexões entre si, de tal forma a minimizar a distância e, por consequência, o custo de tubulações entre esses equipamentos;
- 2) Otimizar o posicionamento dos equipamentos dentro de cada módulo: consiste no emprego da otimização para posicionar os equipamentos dentro de cada módulo; e
- 3) Otimizar o posicionamento dos módulos: consiste no emprego da otimização para posicionar os módulos da planta de processo.

Na sequência, serão apresentados alguns trabalhos contendo modelos matemáticos para a otimização do posicionamento de equipamentos e módulos em uma planta de processo.

2.3.1 Otimização do posicionamento de equipamentos

Na literatura, são encontrados trabalhos contendo modelos matemáticos propostos para a otimização do posicionamento dos equipamentos de uma planta de processo relacionados a aspectos econômicos e também de segurança. Na sequência, são apresentados alguns destes trabalhos.

Papageorgiou e Rotstein (1998) apresentam uma formulação matemática para o problema de alocação de equipamentos de seções retangulares de uma planta de processo em um espaço bidimensional contínuo. De maneira geral, o problema pode ser descrito da seguinte forma: dado um conjunto de n equipamentos e suas dimensões, os custos de tubulação e conexão entre equipamentos, limitações de alocação, distâncias mínimas entre equipamentos (aspectos de segurança, por exemplo) e seções de produção; determine a alocação de cada equipamento (coordenada e orientação), de modo a minimizar o custo do *layout* da planta. O problema é formulado como um modelo de programação inteira mista. A função objetivo considera a minimização do custo total de conexão entre equipamentos que leva em consideração os custos de tubulação e outras despesas operacionais relacionadas, como o custo de bombeamento.

De acordo com Georgiadis et al. (1999), a geração de um bom *layout* é um estágio importante no projeto de uma nova planta ou na adaptação de uma instalação existente. As decisões de *layout* afetam diversas disciplinas como tubulação, eletricidade, instrumentação, etc. e, portanto, têm grande impacto no custo total da planta. Além disso, o *layout* tem grande impacto na segurança, operabilidade e manutenibilidade de qualquer planta química. Em seu trabalho, Georgiadis et al. (1999) apresenta uma abordagem em programação matemática para o problema da alocação de equipamentos em um determinado espaço de duas ou três dimensões considerando uma representação de domínio discreta. O problema é formulado como um modelo de programação inteira mista sendo considerados equipamentos de tamanhos e geometrias distintas. A função objetivo considera os custos de transporte (horizontal e vertical), de tubulação, da construção de pisos (múltiplos pisos) e do tamanho da planta. O procedimento de otimização resulta nas coordenadas de cada unidade, no comprimento total de tubulação e na área ocupada pela planta.

Patsiatzis e Papageorgiou (2002) fizeram um aprimoramento em relação ao trabalho anterior de Papageorgiou e Rotstein (1998) e apresentam uma formulação matemática para o problema de *layout* de uma planta de processo em múltiplos pisos. De maneira geral, o problema pode ser descrito da seguinte forma: dado um conjunto de n equipamentos e suas dimensões, um conjunto de k potenciais pisos, a matriz de conectividade, dados de custo (conexão, bombeamento, construção), altura do piso, limitações de alocação e distâncias mínimas de segurança; determine o número de pisos, a área ocupada e a alocação de cada equipamento em cada piso, de modo a minimizar o custo total do *layout* da planta. O problema é formulado como um modelo de programação inteira mista, baseado em uma representação de domínio contínua. Além dos custos de tubulação, a função objetivo considera os custos de bombeamento, de construção de pisos e de tamanho da planta.

Guirardello e Swaney (2005) apresentam em seu trabalho uma abordagem para o problema de otimização do *layout* e roteamento de tubulações de plantas químicas. O problema é decomposto em uma seqüência de subproblemas que são resolvidos usando modelos de programação inteira mista. O procedimento geral utilizado no trabalho é o seguinte: dividir a planta em módulos com número de componentes menor do que a planta original, realizar otimização do *layout* dos componentes dentro de cada módulo e executar a otimização do *layout* dos módulos. A otimização do *layout* dos componentes e módulos em um espaço tridimensional contínuo utiliza uma função objetivo que inclui o custo de tamanho da planta, de tubulações e de suportes para os componentes elevados, com restrições de distância mínima e sem sobreposição. Os componentes e módulos são representados como sólidos retangulares e os bocais para conexão de tubulação são posicionados nas faces desses sólidos.

Franceira, Almeida e Guirardello (2007) apresenta um estudo de otimização o *layout* de uma planta de processo químico, formulado como um *QAP*, onde os elementos são alocados a uma grade de posições predeterminadas em um espaço tridimensional. A função objetivo inclui os custos de tubulação, bombeamento, instalação dos componentes e suporte para os componentes elevados. As restrições de um problema de *layout*, como distâncias de segurança mínimas, também estão incluídas na função objetivo como penalidades. O problema de atribuição quadrática resultante é resolvido usando um método de recozimento simulado, devido ao grande tamanho do problema.

Xu e Papageorgiou (2009) apresentam em seu trabalho uma abordagem para problemas de *layout* de plantas de processo em grande escala. O método proposto utiliza o modelo de programação inteira mista apresentado por Papageorgiou e Rotstein (1998). Os *layouts* finais da planta são determinados a partir de uma solução viável inicial seguida por um procedimento de melhoria iterativa o qual são fixadas as posições relativas de algumas unidades enquanto o algoritmo trabalha em outras. O procedimento é repetido até que não haja mais melhorias. A seleção de quais unidades terão suas posições relativas fixadas pode ser feita randomicamente ou com base em alguma distribuição de probabilidades.

Nos trabalhos apresentados até aqui, os aspectos de segurança são considerados implicitamente na formulação do problema, por exemplo, através das restrições de distâncias mínimas entre equipamentos. Nos últimos anos, porém, os trabalhos relacionados ao tema consideram os aspectos de segurança de maneira explícita na função objetivo como mostrado nos trabalhos na sequência.

Na presença de riscos de explosão física, as distâncias de segurança devem ser consideradas para a elaboração de *layouts* mais razoáveis e seguros (PARK et al., 2011). De modo a considerar essas distâncias de segurança, Park et al. (2011) utilizaram uma análise de conseqüências para calcular a probabilidade de explosão física de cada equipamento apresentando, em seu trabalho, uma formulação matemática para o problema de *layout* de uma planta de processo de múltiplos pisos que também considera esse risco. O método apresentado utiliza o modelo de programação inteira mista proposto por Patsiatzis e Papageorgiou (2002) com a adição dos custos devido a danos provocados pela explosão física de equipamentos na função objetivo.

Segundo Han, Cho e Yoon (2013), o *layout* do processo de plantas químicas geralmente é projetado em uma configuração compacta para eficiência econômica. No entanto, a maioria das plantas de processo é vulnerável a acidentes como incêndios e explosões, e esses acidentes podem causar danos graves aos humanos. Em seu estudo, Han, Cho e Yoon (2013) avaliaram quantitativamente os riscos diretos para seres humanos de tais perigos convertendo-os em distâncias de segurança para cada item de equipamento. O método de otimização do *layout* de uma planta de processo, apresentado em seu trabalho, utiliza o modelo de programação inteira mista proposto por Papageorgiou e Rotstein (1998) adaptado para uma formulação com zonas de risco construídas usando essas distâncias de segurança. A função objetivo considera ainda os

custos de tubulação e da área da planta e os custos de dispositivos de proteção adicionais.

Caputo et al. (2015) apresenta em seu trabalho um método baseado em algoritmo genético para otimizar o *layout* de uma planta de processo. A localização relativa das principais unidades de processo é determinada de modo a minimizar uma função de custo anual, incluindo o custo de transferência de material entre as unidades de processo (custos de tubulação e bombeamento), o custo da área ocupada e a perda anual esperada resultante de danos a cada unidade secundária causada por acidentes primários ocorrendo em unidades de processo próximas. A quantidade anual de danos e prejuízos para cada *layout* é calculada como a soma dos valores esperados de probabilidade para a quantidade de danos causada por acidente em cada unidade. O modelo proposto considera uma representação de domínio discreta em 2 dimensões sendo os componentes são representados por sólidos retangulares.

Latifi et al. (2017), em seu trabalho, propõem uma formulação de *MINLP* (sigla, em inglês, para Programação Não-Linear Inteira Mista) para o problema do *layout* de uma planta de processo, considerando o risco de liberação tóxica, possíveis cenários de fogo, explosão e os efeitos da combinação desses eventos. O método considera a formulação matemática apresentada por Guirardello e Swaney (2005) com a adição de restrições de emissões tóxicas e a ocorrência de eventos em cascata sendo empregado o algoritmo metaheurístico de Bat para resolvê-lo.

Tabela 2.1 - Resumo dos trabalhos desenvolvidos para o problema de otimização do posicionamento de equipamentos.

Autores (Ano)	Representação do Domínio	Configuração do Layout	Representação dos Componentes	Posição dos Bocais	Função Objetivo	Restrições	Formulação do Problema	Método de Resolução
Papageorgiou e Rotstein (1998)	2 dimensões (contínuo)	Único piso	Sólidos retangulares	Centro geométrico do componente	Custos de conexão de tubulações.	Não sobreposição e distância entre componentes.	<i>MILP</i>	<i>Branch-and-Bound</i>
Georgiadis et al. (1999)	2 ou 3 dimensões (discretizado)	Único piso ou múltiplos pisos	Sólidos retangulares	Posição no <i>grid</i>	Custos de transporte (horizontal e vertical); Custos de conexão de tubulações; Custo de construção de pisos; Custo da área da planta.	Alocação no <i>grid</i> e nos pisos e distância entre componentes.	<i>MILP</i>	<i>Branch-and-Bound</i>
Patsiatzis e Papageorgiou (2002)	3 dimensões (contínuo)	Múltiplos pisos	Sólidos retangulares	Centro geométrico do componente	Custos de bombeamento (horizontal e vertical); Custos de conexão de tubulações; Custo de construção de pisos; Custo da área da planta.	Alocação nos pisos, não sobreposição e distância entre componentes.	<i>MILP</i>	<i>Branch-and-Bound</i>
Guirardello e Swaney (2005)	3 dimensões (contínuo)	Campo aberto	Sólidos retangulares	Faces do componente	Custos de tubulações; Custos de suporte para os componentes; Custo do perímetro da planta.	Não sobreposição e distância mínima entre componentes.	<i>MILP</i>	<i>Branch-and-Bound</i>
Franceira, Almeida e Guirardello (2007)	3 dimensões (discretizado)	Campo aberto	Sólidos retangulares	Posição no <i>grid</i>	Custos de tubulações; Custos de bombeamento; Custos de instalação dos componentes; Custos de suporte para os componentes; Custos de penalidades (distância mínima de segurança e pontos restritos).	Não sobreposição e distância mínima entre componentes.	<i>QAP</i>	Recozimento Simulado
Xu e Papageorgiou (2009)	2 dimensões (contínuo)	Único piso	Sólidos retangulares	Centro geométrico do componente	Custos de conexão de tubulações.	Não sobreposição e distância entre componentes.	<i>MILP</i>	Algoritmo Iterativo (uso do <i>branch-and-bound</i> em cada iteração)
Park et al. (2011)	3 dimensões (contínuo)	Múltiplos pisos	Sólidos retangulares	Centro geométrico do componente	Custos de bombeamento (horizontal e vertical); Custos de conexão de tubulações; Custo de construção de pisos; Custo da área da planta; Custos de danos esperados.	Alocação nos pisos, não sobreposição, distância entre componentes e distância mínima de segurança (no caso de explosões).	<i>MILP</i>	<i>Branch-and-Bound</i>
Han, Cho e Yoon (2013)	2 dimensões (contínuo)	Único piso	Sólidos retangulares	Centro geométrico do componente	Custos de conexão de tubulações; Custo da área da planta; Custos de dispositivos de proteção adicionais.	Não sobreposição, distância entre componentes e distância mínima de segurança (zonas de risco).	<i>MILP</i>	<i>Branch-and-Bound</i>
Caputo et al. (2015)	2 dimensões (discretizado)	Único piso	Sólidos retangulares	Centro geométrico do componente	Custos de tubulação; Custos de bombeamento; Custos de segurança; Custo da área da planta.	Não sobreposição (a distância mínima entre componentes intrinsicamente considerada na FO).	Modelo de Algoritmo Genético	Algoritmo Genético
Latifi, Mohammadi e Khakzad (2017)	3 dimensões (contínuo)	Campo aberto	Sólidos retangulares	Faces do componente	Custos de tubulações; Custos de suporte para os componentes; Custo do perímetro da planta; Custos de dispositivos de proteção; Custo de emissões tóxicas; Custos de eventos em cascata.	Não sobreposição, distância mínima entre componentes, emissões tóxicas e ocorrência de eventos em cascata.	<i>MINLP</i>	Algoritmo de <i>Bat</i>

2.3.2 Otimização do posicionamento de módulos

O problema de otimização do posicionamento de módulos de uma planta de processo pode ser classificado quanto ao sistema de manuseio sendo os mais comuns os *layouts* em um único corredor ou em múltiplos corredores. Este trabalho abordará os problemas de posicionamento de máquinas em duas fileiras conhecido por *Double Row Layout Problems (DRLP)*. Trabalhos, encontrados na literatura, contendo modelos matemáticos propostos para a solução do *DRLP* são apresentados na sequência.

De acordo com Amaral (2013), o objetivo do *DRLP* é alocar um dado conjunto de n módulos em ambos os lados de um corredor em linha reta, de modo que o custo total de transporte de materiais entre módulos seja minimizado. Amaral (2013) apresenta em seu trabalho uma formulação de *DRLP* em programação inteira mista, onde é assumido um corredor de largura igual a zero e a área do *layout* não é considerada.

Murray, Zuo e Smith (2012) apresentam em seu trabalho uma formulação de *DRLP* estendida que abrange a minimização da área do *layout* na função objetivo, além do custo de transporte de materiais, e que permite larguras de corredor diferentes de zero. Murray, Zuo e Smith (2012) mostraram em seu trabalho que, embora os problemas de pequena escala possam ser resolvidos de maneira ótima por *softwares* comerciais de programação inteira, os tempos de solução são altamente sensíveis ao número de módulos do *layout*. Murray, Zuo e Smith (2012) também apresentaram uma heurística de busca tabu para problemas de tamanho moderado.

Zuo, Murray e Smith (2014) apresentam em seu trabalho uma nova abordagem combinando busca tabu multiobjetiva com programação linear para o *DRLP*. Zuo, Murray e Smith (2014) mostraram que a abordagem proposta é capaz de obter resultados melhores do que os obtidos por abordagens alternativas como algoritmos genéticos multiobjetivos.

3 SISTEMAS DE PRODUÇÃO *OFFSHORE*

3.1 Processamento Primário de Petróleo

No reservatório de um campo produtor, o petróleo encontra-se em uma fase líquida conhecida como fase oleosa ou simplesmente óleo. No entanto, ao alcançar a superfície, os hidrocarbonetos mais leves e alguns outros gases, como o gás sulfídrico (H_2S) e o dióxido de carbono (CO_2), aparecem também na fase vapor, em equilíbrio termodinâmico na fase líquida (óleo). Isso ocorre devido à queda de pressão durante a elevação do petróleo a superfície e as quedas de pressão localizadas em válvulas de controle nas instalações de produção.

Além da fase oleosa e gasosa, um campo de petróleo normalmente produz água, após certo período de operação do campo, seja por estar presente normalmente no reservatório ou pela sua injeção, em um processo que visa o aumento da recuperação do petróleo.

As correntes de fluidos de diferentes poços que chegam através dos *manifolds* de produção até a superfície, não se encontram ainda adequadas à utilização ou exportação. Como o interesse econômico é somente na produção de hidrocarbonetos (óleo e gás), há necessidade de dotar os campos de facilidades de produção, que são instalações destinadas a efetuar o processamento primário dos fluidos, ou seja, a separação gás/óleo/água.

Entende-se por processamento primário de petróleo a primeira etapa, ainda na fase de produção, pela qual o petróleo passa depois que sai do reservatório e alcança a superfície. De acordo com Quelhas et al. (2011), o processamento primário de petróleo tem como objetivos:

- Promover a separação das três fases: oleosa, gasosa e aquosa;
- Tratar a fase oleosa para redução do teor de água emulsionada e dos sais nela dissolvidos;
- Tratar a fase gasosa para redução do teor de água (vapor) e de outros contaminantes, se necessário; e
- Tratar água separada do petróleo, para descarte e/ou reinjeção em poços produtores.

Na Figura 3.1 está apresentado um esquema com as principais etapas do processamento primário.

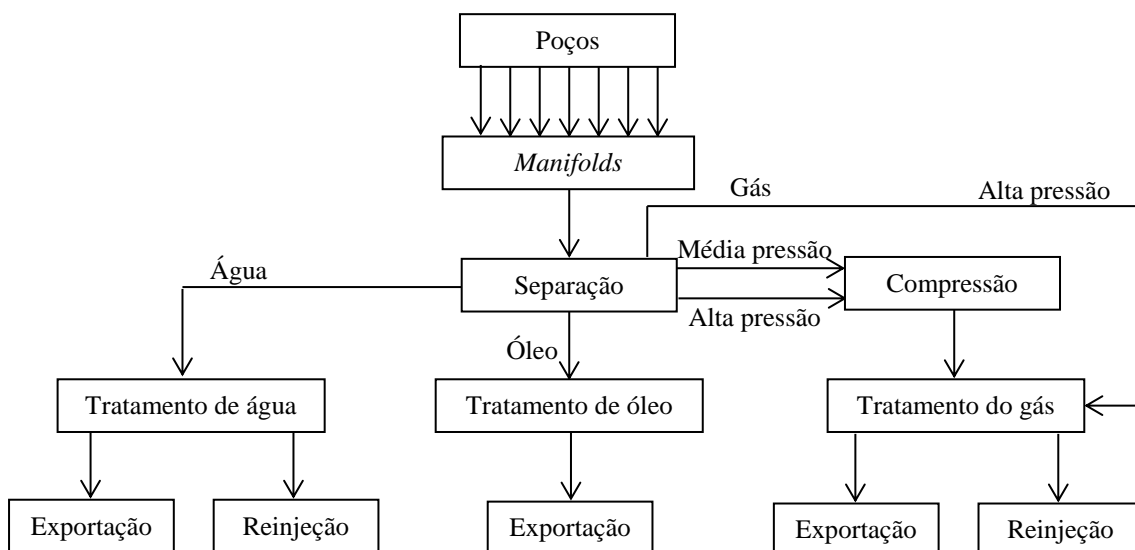


Figura 3.1 - Esquema do processamento primário de petróleo.

3.2 Unidade Estacionária de Produção

Todo o processamento primário de petróleo ocorre na região produtora, em instalações de superfície que, quando localizadas no mar (*offshore*), são denominadas Unidades Estacionárias de Produção (UEP). Deste modo, podemos definir UEP como sendo uma estrutura que disponibiliza na superfície suporte à produção de petróleo no mar, através de uma planta de separação de óleo/gás/água, equipada com heliporto e acomodações para centenas de pessoas que mantêm ininterruptamente o funcionamento das operações em sistemas de turnos.

Existem diversos tipos de UEPs empregadas para produção de petróleo *offshore*. De acordo com Franco et al. (2003), para a escolha do tipo de UEP utilizam-se parâmetros como a área do reservatório, o número de poços, a vazão diária por poço, a lâmina d'água (distância da superfície da água até o fundo do mar) e as condições ambientais (forças dos ventos, ondas e correntezas). De maneira geral, podemos classificar as UEPs como fixas ou flutuantes.

As UEPs fixas foram as primeiras a serem utilizadas para desenvolver reservas de petróleo e gás em águas relativamente rasas sendo, normalmente, empregadas em campos cuja lâmina d'água não ultrapassa 300 metros. São formadas por estruturas de aço soldadas e instaladas no local de operação através de estacas cravadas no leito submarino. Já as UEPs flutuantes têm sido utilizadas para o desenvolvimento de campos

de petróleo e gás em águas profundas e ultraprofundas, podendo ser empregadas em campos cuja lâmina d'água ultrapassa 2.000 metros. Dispõem de um sistema de ancoragem, de modo a limitar sua área de movimento a um determinado espaço que não comprometa o funcionamento dos equipamentos instalados.

A seguir, são apresentados os três tipos de UEPs, fixas e flutuantes, mais comumente utilizados para produção de petróleo *offshore* no Brasil.

3.2.1 Fixa

É um tipo de plataforma fixa que funciona como uma estrutura rígida, fixada no fundo do mar por um sistema de estacas cravadas. Podem ser instaladas em lâminas d'água de até 300 metros. Não possui capacidade de armazenamento sendo o escoamento da produção efetuado através de oleodutos. A instalação é mais simples e permite que o controle dos poços seja feito na superfície (completação seca).



Figura 3.2 - Plataforma fixa de Mexilhão operando na Bacia de Santos.

Fonte: PETROBRAS. Tipos de plataforma.

3.2.2 Semisubmersível

É um tipo de plataforma flutuante, estabilizada por colunas e ancorada no solo marinho. Podem ser instaladas em lâminas d'água de mais de 2.000 metros. Não possui capacidade de armazenamento sendo o escoamento da produção efetuado através de oleodutos ou armazenamento em navios e posterior descarregamento nos terminais. Especialmente projetada para ter pouco movimento.



Figura 3.3 - Plataforma semissubmersível P-55 operando no campo de Roncador, Bacia de Campos.

Fonte: PETROBRAS. Tipos de plataforma.

3.2.3 FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*)

É um tipo de plataforma flutuante que podem ser construções novas ou conversões de navios petroleiros (maioria dos casos). Assim como a semissubmersível, é ancorada no solo marinho. Podem ser instaladas em lâminas d'água de mais de 2.000 metros. Possui capacidade de armazenamento, sendo que o óleo é exportado para navios petroleiros, que o descarregam nos terminais. A capacidade de armazenamento permite que opere a grandes distâncias da costa, onde a construção de oleodutos é inviável.



Figura 3.4 - FPSO P-63 opera no campo de Papa-Terra, no sul da Bacia de Campos.

Fonte: PETROBRAS. Tipos de plataforma.

3.3 Planta de Processo de uma UEP

Dependendo da previsão da quantidade de fluidos produzidos e de um estudo de viabilidade técnico-econômica, a instalação de superfície pode variar em complexidade, sendo que: as mais simples consistem apenas em vasos separadores bifásicos gás/óleo ou trifásicos gás/óleo/água, enquanto as mais complexas, além dos separadores, podem incluir o tratamento e a compressão do gás, o tratamento do óleo e o tratamento da água, tanto para descarte quanto para reinjeção nos poços. Na figura 3.5 é apresentada uma instalação de superfície bastante complexa que incluem sistemas para o tratamento de

óleo e de água, tratamento e compressão de gás (para exportação ou para reinjeção), captação e tratamento de água para injeção nos poços, entre outros sistemas.



Figura 3.5 - Exemplo de Unidade Estacionária de Produção (UEP) do tipo FPSO e sua planta de processo.

Fonte: PETROBRAS. Tipos de plataforma.

3.3.1 Sistemas de separação

O sistema de separação utilizado no processamento primário de petróleo é constituído de um conjunto de vasos separadores (bifásicos ou trifásicos) em série, que pode ter várias configurações, que diferem entre si pelo número de estágios utilizados, dependendo da qualidade da separação desejada entre o gás e o óleo e da densidade do petróleo produzido. Tipicamente, petróleos pesados são separados em um ou dois vasos com níveis de pressão diferentes, enquanto os leves podem passar por vasos separadores que operam com até três níveis de pressão: alta, intermediária e baixa, o que permite a maximização da produção de óleo e o processamento, na mesma instalação de produção, de óleos de poços com diferentes níveis de pressão. Nas Figuras 3.6 é

apresentado um esquema de separação com a utilização de um separador trifásico e na Figura 3.7 é apresentado um exemplo de separador trifásico.

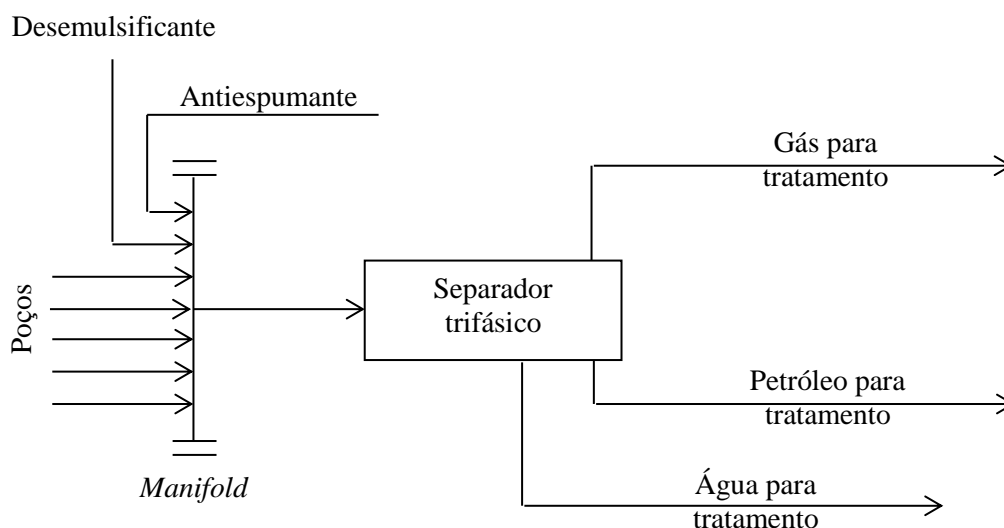


Figura 3.6 - Esquema de um sistema de separação com separador trifásico.

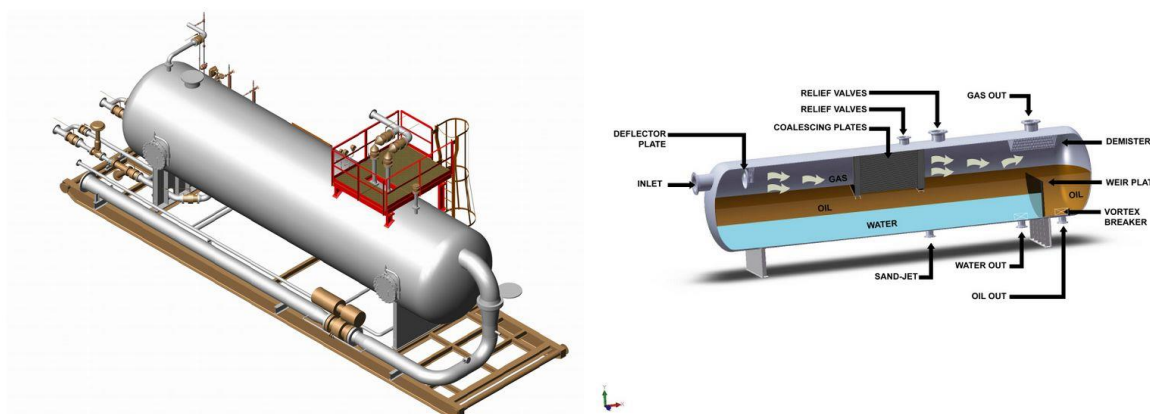


Figura 3.7 - Exemplo de separador trifásico.

Fonte: IET. Oil and gas separators.

Após uma separação primária das correntes de fluidos produzidos, ocorre o tratamento individual das fases gás, óleo e água a fim de se atingir as especificações necessárias à comercialização do óleo e gás e as especificações ambientais para o descarte da água:

- O gás deve estar disponível em uma pressão especificada para exportação e não deve conter teores excessivos de H_2S ou CO_2 e H_2O (vapor);

- O óleo não pode conter mais do que 1% (em volume) de água emulsionada e de sedimentos (BS&W¹) e o teor de sais dissolvidos na água deve ser de, no máximo, 285 mg/L de óleo; e
- A água produzida deve ser tratada antes de ser descartada para atender as regulamentações ambientais. No Brasil, de acordo com a Resolução CONAMA 393/07, a concentração média mensal de óleos e graxas² é limitada ao valor máximo de 29 mg/L, com valor máximo diário de 42 mg/L, para descarte no mar.

3.3.2 Processamento do óleo

O petróleo efluente do último estágio de separação possui, em sua composição, uma parcela de água, dispersa no óleo em forma de gotículas de pequeno diâmetro (entre 1 µm e 10 µm), ou seja, emulsionada, a qual deve ser removida do óleo nos vasos tratadores de óleo. Estes equipamentos utilizam uma combinação de métodos que se baseiam na adição de compostos químicos (chamados desemulsificantes), calor, introdução de um campo elétrico e tempo de residência para romper a película de compostos emulsificantes que circundam as gotículas de água permitindo que elas se coalesçam, formando gotas maiores que decantam e permitem a separação em duas fases líquidas, uma oleosa e uma aquosa. Se o óleo produzido tiver um elevado teor de sal pode ser necessário adicionar água fresca ao óleo para permitir a diluição dos sais dissolvidos na água remanescente que sai com o óleo tratado. Na Figura 3.8 é apresentado um exemplo de tratador de óleo.

¹ BS&W (Basic Sediments and Water): % em volume de água e sedimentos em relação ao volume total da emulsão.

² O teor de óleos e graxas na água produzida é conhecido como TOG.

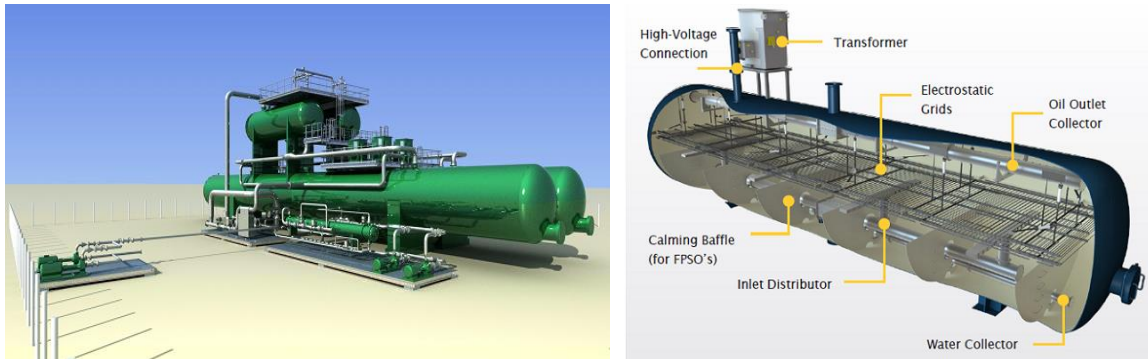


Figura 3.8 - Exemplo de tratador de óleo.

Fonte: FRAMES. Electrostatic Coalescers.

3.3.3 Processamento da água

A corrente de água produzida, que escoar dos vasos separadores e dos vasos tratadores de óleo, necessita passar por um tratamento que visa remover gotículas de óleo arrastadas com a água. Tanques separadores (*skimmers*), hidrociclones e flotadores a gás podem ser utilizados para alcançar o limite máximo admissível de óleo na água a ser descartada ou injetada nos poços. Na Figura 3.9 é apresentado um exemplo de flotador a gás.

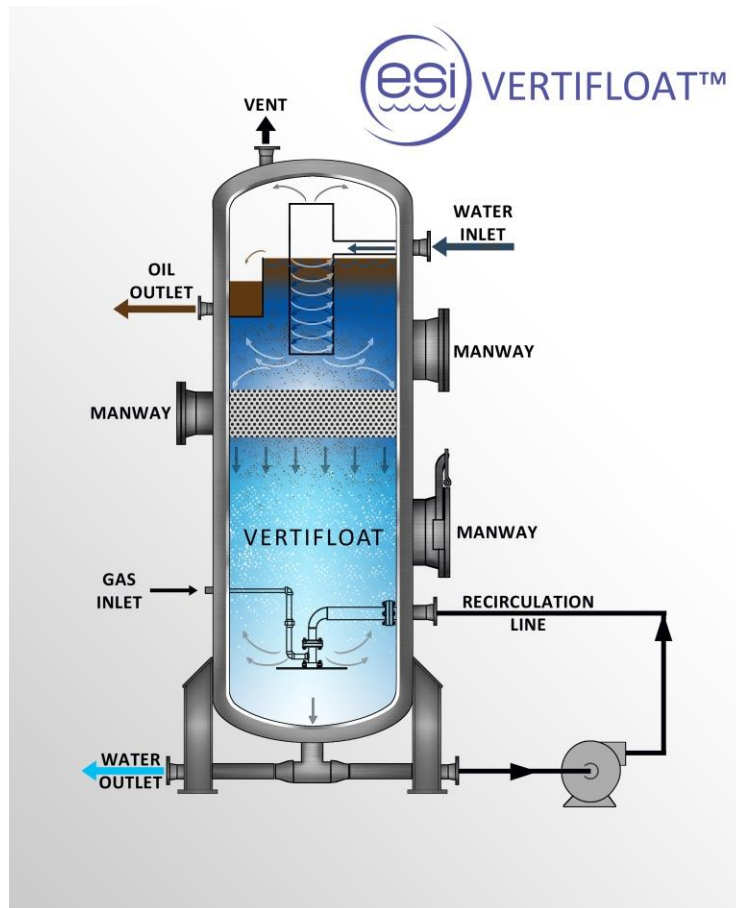


Figura 3.9 - Exemplo de flotador a gás.

Fonte: ESI. Vertifloat™ compact flotation unit.

3.3.4 Processamento do gás

As correntes gasosas oriundas dos vasos separadores nos níveis de pressão, baixo e intermediário, precisam ser comprimidas para serem exportadas da instalação, ou para serem levadas às unidades de tratamento do gás. Vários estágios de compressão podem ser necessários. Os compressores são normalmente acionados por turbinas a gás. Os compressores devem ser dimensionados com certo grau de flexibilidade para atender as variações de pressão e vazão volumétrica dos gases que ocorrem durante a vida útil de um campo. Alguns campos requerem que o gás produzido passe por um processo de remoção de gases ácidos, como o dióxido de carbono (CO_2) e o ácido sulfídrico (H_2S), quando o teor destes contaminantes for elevado. A maioria das facilidades de produção requer que o gás passe por um sistema de remoção do vapor de água presente no gás a fim de reduzir a possibilidade de formação de hidratos (sólidos de hidrocarbonetos leves e água que podem obstruir o sistema de gás). Na Figura 3.10 é apresentado um exemplo de unidade de remoção de CO_2 .



Figura 3.10 - Skid de remoção de CO₂.

Fonte: ILSUNG. CO₂ Removal Module for Petrobras has been shipped out.

3.4 Arranjo da Planta de Processo de uma UEP

Não são facilmente encontrados na literatura, trabalhos que orientem na elaboração do arranjo físico da planta de processo de uma UEP. Este tipo de conhecimento é adquirido de acordo com a experiência da empresa em elaborar projetos de UEPs e, normalmente, se encontra disponível em diretrizes de projeto que variam de empresa para empresa.

A dificuldade em se elaborar um arranjo físico adequado às necessidades de processo, tendo em vista a segurança operacional da instalação e requisitos de operação e manutenção, vem da grande quantidade de equipamentos a serem “arranjados”. O tipo de UEP mais comumente empregada na Petrobras é o *FPSO* (especialmente dentre as mais recentes), nestes é comum a especificação de algumas centenas de equipamentos já nas fases iniciais do projeto. Além disso, devido à limitada área de convés em um *FPSO*, é comum a disposição de equipamentos em diversas elevações fazendo com que a planta de processo fique bastante verticalizada.

Devido a estratégias de contratação e de construção, é comum dividir a planta de processo de um *FPSO* em módulos. Esses módulos de montagem, normalmente

agrupam os equipamentos de um mesmo sistema ou de um mesmo grupo de sistemas. A correta distribuição dos equipamentos de um sistema em um módulo propicia tanto benefícios em termos de operação e manutenção (o operador encontra em um mesmo local todos os itens daquele sistema) quanto de *CAPEX*³ (reduz o custo total de tubulações que conectam os equipamentos do sistema).

Sendo assim, é intuitivo que o arranjo físico da planta de processo deva seguir uma sequência lógica dos fluxos de processo e utilidades, devendo ainda ser previsto um agrupamento dos sistemas e subsistemas, a fim de reduzir o encaminhamento de tubulação e cabeamento, com consequente redução do uso de tubulações em materiais especiais, de grandes diâmetros ou de alta pressão, sem prejuízos às facilidades de manutenção e operação.

Além disso, o *FPSO* deve ser concebido considerando-se a separação entre áreas de alto risco, baixo risco, áreas habitadas e áreas que abriguem equipamentos de segurança e salvatagem. Quando esta separação não for possível, dispositivos de proteção adicionais devem ser previstos.

Existem ainda restrições específicas para o arranjo físico de equipamentos e módulos de um *FPSO* que dependem das características da planta de processo. Por exemplo, os vasos ou tanques de expansão de sistemas fechados de água de resfriamento e aquecimento devem estar localizados no ponto mais alto do sistema.

De modo a exemplificar um projeto do arranjo físico de uma planta de processo, é apresentado na Figura 3.11 um exemplo de Arranjo Geral de *FPSO*. Este documento mostra a distribuição dos equipamentos nos módulos e a dos módulos no convés do *FPSO*. Note que é comum a presença de módulos que possuem mais de uma elevação.

³ *CAPEX* é a sigla da expressão inglesa *Capital Expenditure* (em português, Despesas de Capital ou Investimento em Bens de Capital) e que designa o montante de dinheiro despendido na aquisição (ou introdução de melhorias) de bens de capital de uma determinada empresa.

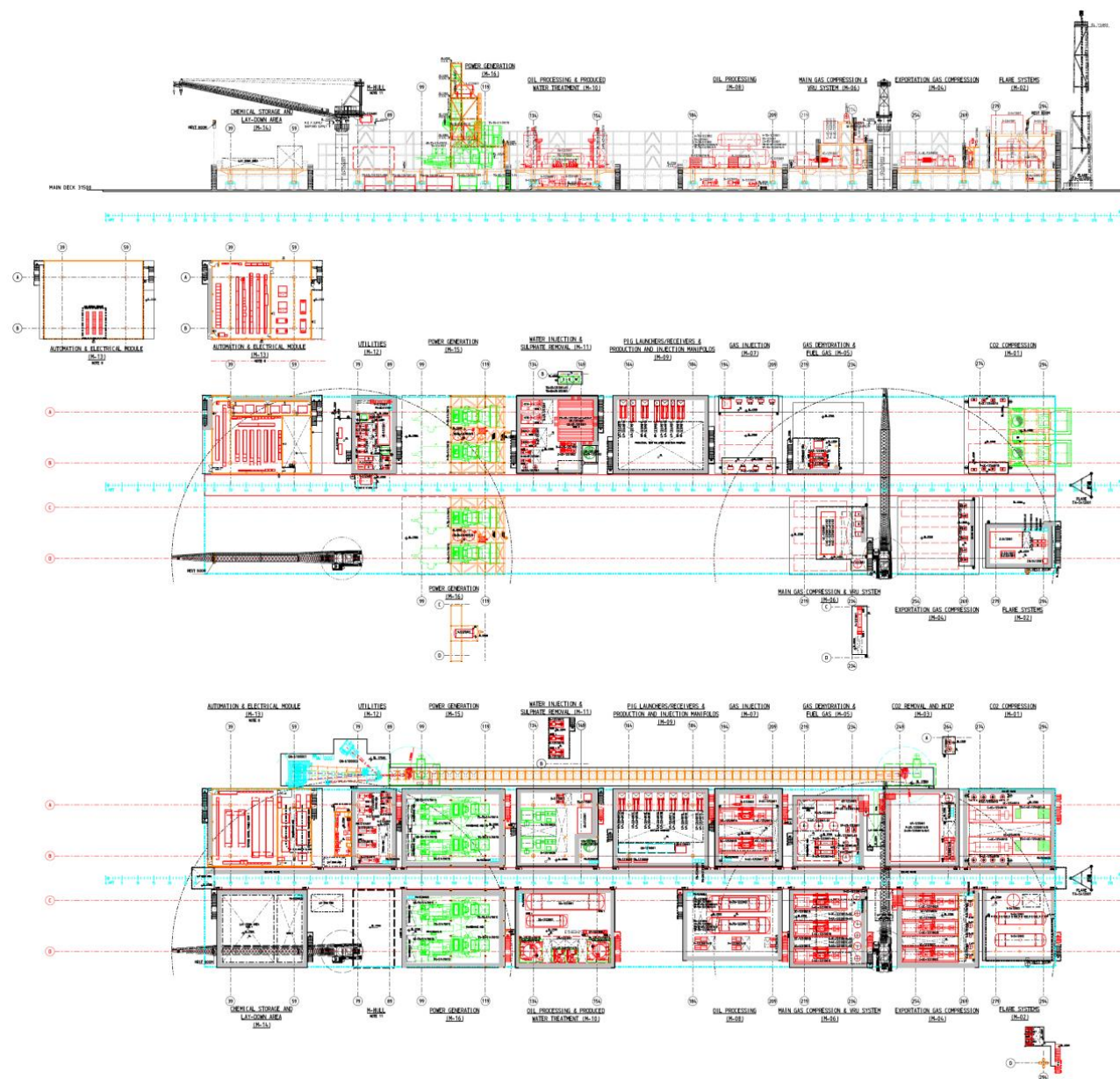


Figura 3.11 - Exemplo de Arranjo Geral da Planta de processamento de uma UEP.

Além do Arranjo Geral, é possível o conceber o arranjo físico de uma UEP através do modelo 3D, nele é possível projetar a UEP em detalhes em um ambiente virtual. A ferramenta de modelagem tridimensional tem se tornado cada vez mais difundida nos empreendimentos de *FPSOs*, sendo utilizada para fins de verificação de interferências, simulação de construção, extrações de quantitativo de materiais, entre inúmeras outras possibilidades de utilização. Na Figura 3.12 é apresentada uma comparação entre o modelo 3D e o *FPSO* real.



Figura 3.12 - (a) Modelo tridimensional (renderizado) da UEP vs (b) UEP real.

Fonte: (a) PETROBRAS. Fatos e Dados: Iniciamos produção da P-66 no Campo de Lula, no pré-sal da Bacia de Santos. (b) IBAMA. Ibama autoriza operação da plataforma P-66 na Bacia de Santos.

Enfim, a planta de processo de um *FPSO* proporciona campo fértil para o estudo aprofundado de arranjo físico, dada sua complexidade, seu emprego intensivo de capital e seus múltiplos objetivos. É interessante observar que apesar disto, na prática, não se observa o uso de modelos matemáticos de suporte a decisão de *layout*.

4 METODOLOGIA

4.1 Concepção do Arranjo Físico da Planta de Processo de um FPSO

Conforme visto no capítulo anterior, uma UEP é uma grande instalação que realiza o processamento primário de petróleo a partir de campos de petróleo e gás *offshore*. Comparativamente às instalações *onshore*, as UEPs possuem limitada área para disposição dos vários equipamentos de sua planta de processo, assim, é importante utilizar o espaço disponível de maneira eficiente. Além disso, deve haver espaço suficiente na planta de processo para permitir correta operação e manutenção dos equipamentos, bem como para a circulação de operadores. Este trabalho trata especificamente do arranjo físico da planta de processo de UEPs do tipo FPSO.

Os insumos mínimos necessários para a concepção do arranjo físico da planta de processo de um FPSO vêm de documentos, tais como: fluxogramas de processo, lista de equipamentos com dimensões e das especificações técnicas dos equipamentos (como posições dos bocais, requisitos de acesso para operação e manutenção, etc.).

De posse desses documentos, é então desenvolvido o arranjo preliminar do FPSO. Os equipamentos da planta de processo são divididos em módulos e são arranjados dentro dos mesmos. Os módulos são então dispostos sobre o convés do FPSO em fileiras paralelas divididas por um corredor, o *Piperack*. A Figura 4.1 ilustra o processo de desenvolvimento do arranjo preliminar do FPSO.

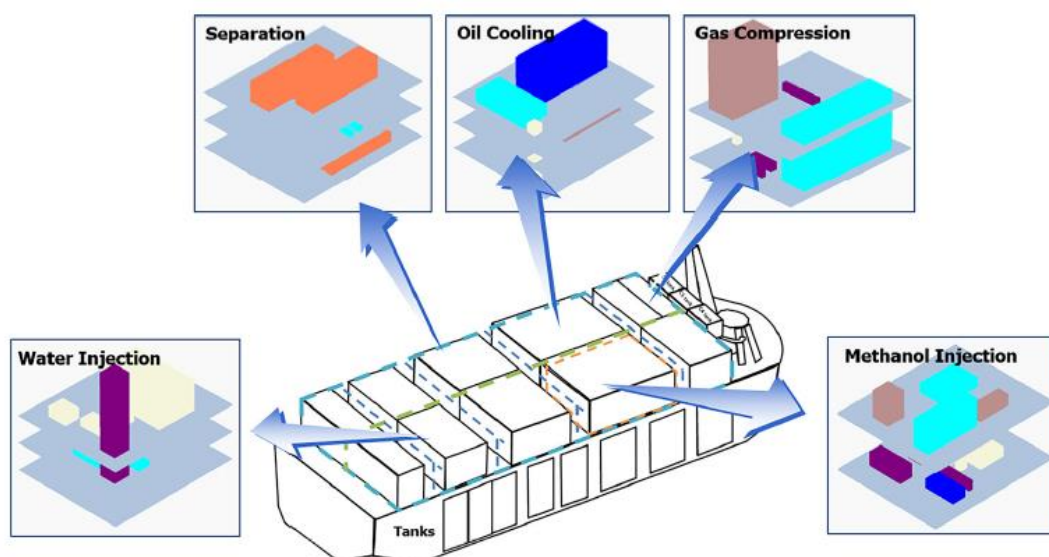


Figura 4.1 – Desenvolvimento do arranjo preliminar de um FPSO.

Fonte: Kim, Roh e Kim, 2017.

Para a concepção do arranjo preliminar de um *FPSO*, deve ser levado em consideração aspectos de segurança, operação e manutenção, bem como os requisitos específicos apresentados no item 3.4 Arranjo da Planta de Processo de uma UEP.

4.2 Abordagem Computacional

A abordagem computacional para o problema de otimização de arranjo físico da planta de processo de um *FPSO* adotada neste trabalho será dividida em três etapas, conforme apresentado no item 2.3 Otimização do *Layout* de Plantas de Processo. Essas três etapas são:

- 1) Dividir a planta em módulos;
- 2) Otimizar o arranjo físico dos equipamentos dentro de cada módulo; e
- 3) Otimizar o arranjo físico dos módulos.

Na etapa 1, os equipamentos especificados no projeto são divididos em grupos de modo que os equipamentos que possuem maior número de conexões entre si fiquem num mesmo espaço físico, ou seja, num mesmo módulo. Normalmente, são agrupados num mesmo módulo os equipamentos de um mesmo sistema ou de um mesmo grupo de sistemas. O *FPSO* P-66, por exemplo, possui os módulos apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Exemplo de módulos de um FPSO.

Módulo	Nome
M01	<i>CO2 Compression</i>
M02	<i>Flare System and Gas Recovery Unit</i>
M03	<i>CO2 Removal and HC Dew Point</i>
M04	<i>Export Gas Compression</i>
M05	<i>Fuel Gas and Gas Dehydration</i>
M06	<i>Main Gas Compression including Vapor Recovery Unit (VRU)</i>
M07	<i>Gas Injection Compression</i>
M08	<i>Oil Processing</i>
M09	<i>Pig Launchers & Receivers and Manifolds</i>
M10	<i>Oil Processing and Production Water Treatment</i>
M11	<i>Water Injection and Sulphate Removal</i>
M12	<i>Utilities</i>
M13	<i>Automation and Electrical</i>
M14	<i>Chemical Storage and Lay-Down Area</i>
M15	<i>Power Generation</i>
M16	<i>Power Generation</i>
M17	<i>Topsides Piperack</i>

Na etapa 2, os equipamentos dentro de um mesmo módulo são dispostos de modo a minimizar os custos relacionados ao *layout*, como o custo das tubulações que interligam os equipamentos, e, ao mesmo tempo, satisfazer uma série de restrições, como manter distâncias mínimas entre os equipamentos para fins de operação, manutenção e segurança. Devido aos motivos apresentados nos itens anteriores, a otimização do *footprint* do módulo também é desejada, devendo, portanto, ser considerada na função objetivo. Deste modo, é bastante comum um módulo possuir duas ou mais elevações para disposição dos equipamentos, conforme mostrado na Figura 4.2.

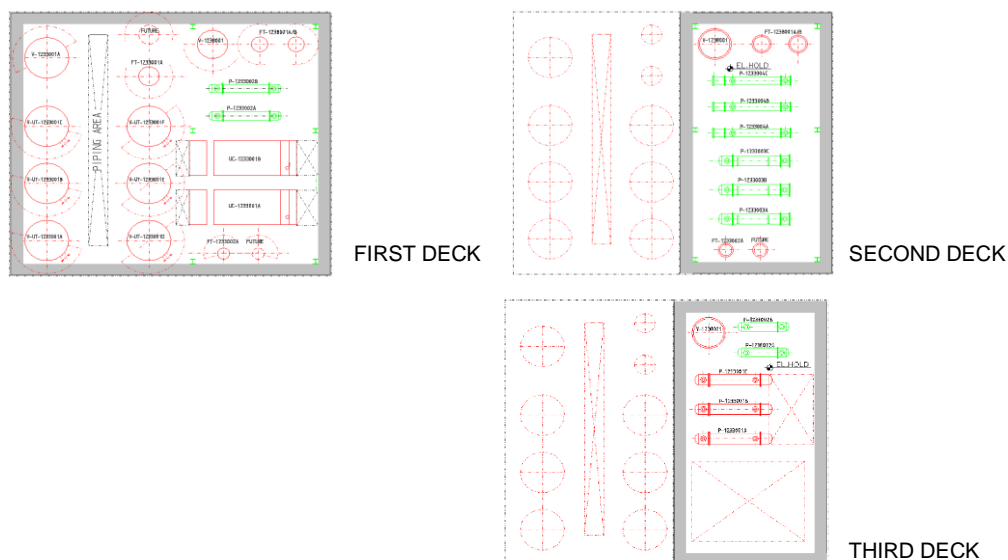


Figura 4.2 - Exemplo de planta de arranjo de um módulo.

Na etapa 3, os módulos devem ser dispostos sobre o convés do *FPSO*, o custo das tubulações que os interligam os módulos bem como requisitos de segurança (segregação de áreas perigosas, por exemplo) devem ser considerados. As linhas de tubulação que interligam módulos devem passar necessariamente por um *Piperack* central e as linhas de tubulação provenientes dos *manifolds* de produção devem passar necessariamente por um módulo específico. As Figuras de 4.3 a 4.5 ilustram as principais linhas de tubulação que interligam os *manifolds* e os módulos de um *FPSO*.

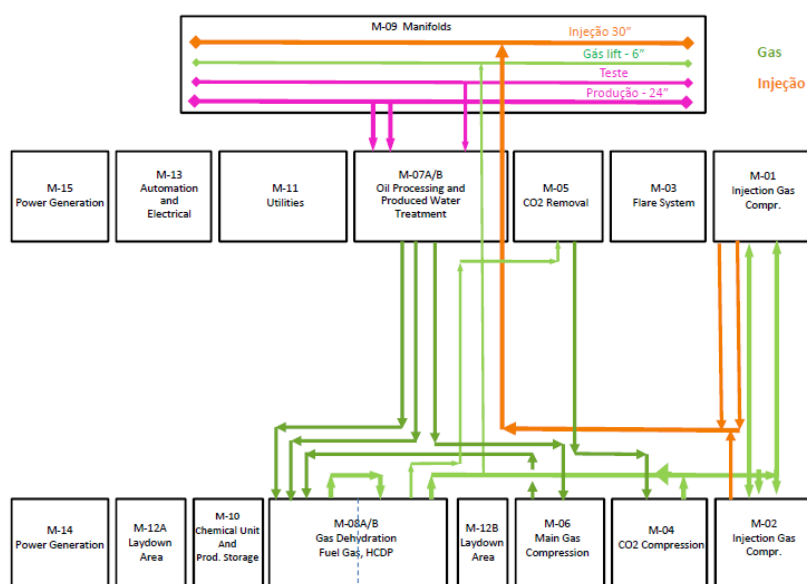


Figura 4.3 - Linhas de processo que interligam os módulos.

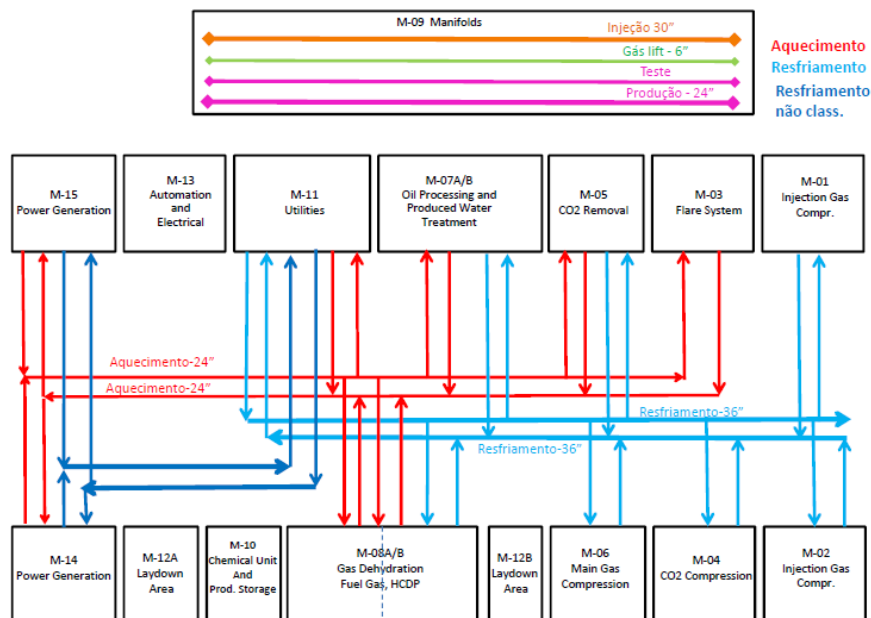


Figura 4.4 - Linhas de utilidades que interligam os módulos.

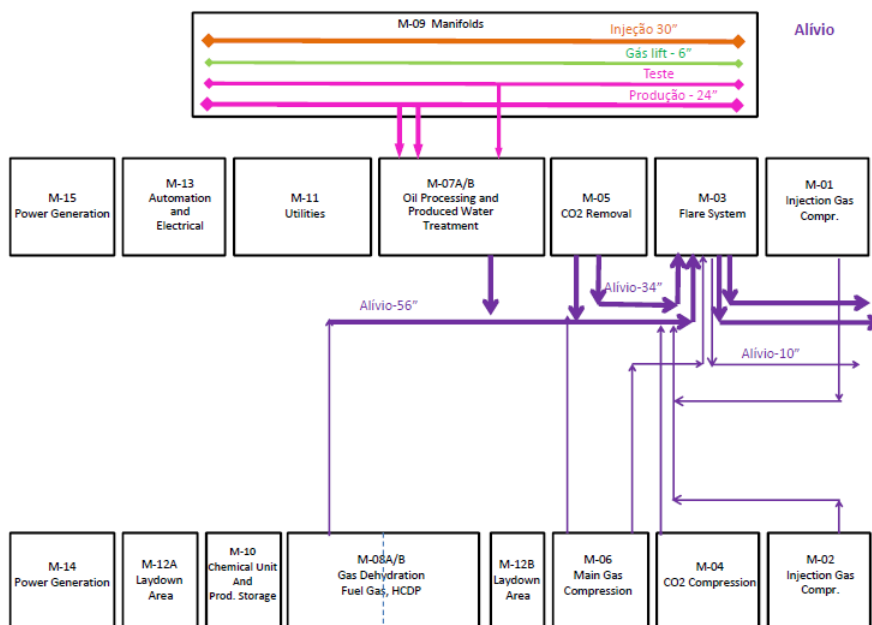


Figura 4.5 - Linhas do sistema de alívio que interligam os módulos.

Para este trabalho, a etapa 1 (dividir a planta em módulos) será considerada dada. Essa divisão é normalmente feita por inspeção, mas poderia ser feita usando métodos de particionamento, conforme discutido no item 7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros. A etapa 2 (otimizar o arranjo físico dos equipamentos dentro de cada módulo) será abordada no Capítulo 5. E, a etapa 3 (otimizar o arranjo físico dos módulos) será abordada no Capítulo 6.

4.3 Modelo Matemático

Como visto nos itens anteriores, a planta de processo de um *FPSO* é, normalmente, dividida em módulos com número equipamentos menor do que a planta original. Assim, o problema de otimização do arranjo físico da planta de processo de um *FPSO* será dividido em vários subproblemas, os quais serão formulados através de modelos de programação inteira mista ou, simplesmente, PIM.

Estes são problemas lineares de otimização envolvendo variáveis discretas (inteiras ou binárias) e contínuas. A forma geral de um problema de PIM pode ser expressa como:

$$\begin{aligned} & \underset{x, y}{\text{minimizar}} && c^T x + d^T y \\ & \text{sujeito a} && Ax + Dy \begin{cases} \leq \\ = \\ \geq \end{cases} b \\ & && x \in R_+^n, \quad y \in Z_+^p \text{ ou } y \in B^p \end{aligned}$$

em que, A , uma matriz ($m \times n$), D , uma matriz ($m \times p$), c , um vetor ($1 \times n$), d , um vetor ($1 \times p$) e b , é um vetor ($m \times 1$), representam os parâmetros do problema. Os vetores de variáveis x e y com dimensões ($n \times 1$) e ($p \times 1$). R_+^n representa o espaço dos vetores com n componentes reais não-negativos, Z_+^p representa o espaço dos vetores com p componentes inteiras não-negativas e B^p representa o espaço dos vetores com p componentes binários não-negativos.

Os problemas de PIM são lineares na função objetivo e nas restrições.

4.4 Métodos de Resolução

Os métodos mais bem-sucedidos para resolver problemas genéricos de programação inteira mista são baseados nos enfoques de enumeração implícita, ou *branch-and-bound*, e de planos de corte. A combinação desses enfoques gerou, na década de 1980, o método *branch-and-cut*, hoje presente nos pacotes comerciais de otimização (ARENALES et al., 2007).

Um conceito fundamental usado nesses métodos é a relaxação linear, que consiste em substituir, na PIM, $y \in Z_+^p$ ou $y \in B^p$ por $y \in R_+^p$, que se torna, portanto, um problema de programação linear.

Para fins explicativos, considere o seguinte exemplo de problema de programação inteira:

$$(P) \quad z = \max \{c^T x : Ax \leq b, x \in Z_+^p\}$$

e sua relaxação linear,

$$(PL) \quad \bar{z} = \max \{c^T x : Ax \leq b, x \in R_+^p\}$$

O valor ótimo do problema relaxado, PL , é um limitante superior do problema de programação inteira P , isto é, $\bar{z} \geq z$.

4.4.1 Branch-and-bound

Se o poliedro $\bar{P} = \{Ax \leq b, x \in R_+^p\}$ é fechado, então o número de soluções inteiras factíveis é finito. Uma forma de obter uma solução ótima para o problema P é utilizar um processo exaustivo, denominado enumeração completa, em que o valor de todas as soluções factíveis é calculado e escolhe-se a de maior valor.

Suponha um problema de otimização envolvendo apenas variáveis binárias, as quais podem ser ordenadas em: x_1, x_2, \dots, x_n . Uma maneira recursiva de enumerar todas as soluções consiste em:

- Fixar x_1 em **zero** e, recursivamente, enumerar todas as soluções para x_2, \dots, x_n ;
- Fixar x_1 em **um** e, recursivamente, enumerar todas as soluções para x_2, \dots, x_n ; e
- Continuar o raciocínio para x_2, \dots, x_n .

Esse procedimento gera uma árvore de busca exemplificada na Figura 4.6, onde cada círculo representa um nó e cada linha representa um *branching*, ou uma ramificação. O primeiro círculo da árvore de busca apresenta o nó raiz ou nó zero, neste nó nenhuma variável está fixada. No primeiro nível de ramificação, a variável x_1 é fixada em zero no nó da esquerda, representando todos os vetores com $x_1 = 0$, e em um nó da direita, representando todos os vetores com $x_1 = 1$. No segundo nível de ramificação, é a vez da variável x_2 ser fixada: partindo, por exemplo, do nó onde $x_1 = 1$, a variável x_2 é fixada em zero no nó da esquerda, representando todos os vetores com $x_1 = 1$ e $x_2 = 0$, e em um nó da direita, representando todos os vetores com $x_1 = 1$ e $x_2 = 1$. Já no terceiro nível de ramificação, é a vez da variável x_3 ser

fixada: partindo, por exemplo, do nó onde $x_1 = 1$ e $x_2 = 0$, a variável x_3 é fixada em zero no nó da esquerda, representando o vetor $x = (1,0,0)^T$, para o caso de $n = 3$.

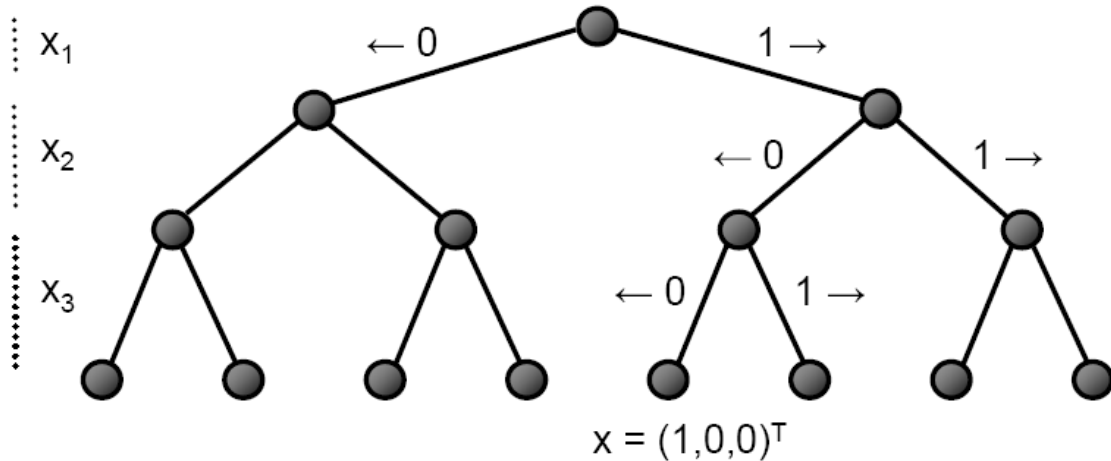


Figura 4.6 - Exemplo de árvore de busca.

Fonte: Bahiense, 2017.

Enumerar todas as possíveis soluções obviamente não é computacionalmente viável quando o espaço de busca é grande, ou seja, quando há muitas soluções. Uma forma de reduzir o espaço de busca consiste em usar informações do problema de programação linear PL para executar um procedimento denominado enumeração implícita, em que subconjuntos de soluções são implicitamente considerados e descartados, pois não contém uma solução ótima, ou então contém soluções ótimas distintas, mas de mesmo valor ótimo. Esses subconjuntos são obtidos pela estratégia *divide and conquer* (ou dividir para conquistar, em português), que separa o problema original P em problemas menores e de mais fácil resolução. Esta estratégia é usada no método *branch-and-bound*.

Limitantes

Limitantes, como o próprio nome diz, são valores máximos e mínimos que definem um intervalo o qual a solução do problema de otimização está contida. Existem dois tipos de limitantes: os limitantes duais, que advêm de uma relaxação para o problema, e os limitantes primais, que advêm de uma solução viável para o problema. No caso de um problema de maximização (minimização):

- \bar{z} , ou limitante superior de z , é o limitante dual (primal); e
- \underline{z} , ou limitante inferior de z , é o limitante primal (dual).

Conforme vimos anteriormente, podemos utilizar da relaxação linear para a obtenção dos limitantes duais do problema de programação inteira. Já, para a obtenção dos limitantes primais, podemos utilizar de métodos heurísticos, como algoritmos construtivos ou algoritmos de melhoria ou busca local.

No método *branch-and-bound*, os limitantes superiores e inferiores são calculados para cada nó da árvore de busca, \bar{z}^k e \underline{z}^k . Para obtenção dos limitantes duais, é resolvida a relaxação linear do problema de programação inteira para cada nó da árvore de busca, através do algoritmo *Simplex* (ARENALES et al., 2007). Já para obtenção dos limitantes primais, são utilizadas as próprias soluções viáveis que vão sendo obtidas durante o desenvolvimento do método de resolução.

Preposição: Seja $\{S_1, S_2, \dots, S_k\}$ uma decomposição de S , e $z^k = \{c^T x : x \in S_k\}$, para $k = 1, \dots, K$. Seja ainda \bar{z}^k (\underline{z}^k) um limitante superior (inferior) para z^k . Então os valores de \bar{z} e \underline{z} abaixo são limitantes superior e inferior de z , respectivamente:

$$\bar{z} = \max_k \bar{z}^k \quad \text{e} \quad \underline{z} = \max_k \underline{z}^k.$$

Podas na árvore de *branch-and-bound*

Utilizando a informação dos limitantes superior e inferior obtidos para cada nó, torna-se possível efetuar podas na árvore de *branch-and-bound*. Essas podas podem ser de três tipos:

- **Dominância:** se o valor da relaxação em um nó k , \bar{z}^k (\underline{z}^k), é menor (maior) ou igual ao valor da melhor solução viável conhecida para o problema \underline{z} (\bar{z}), então todas as soluções com o prefixo corrente são sub-ótimas e podem ser eliminadas;
- **Otimidade:** se a relaxação em um nó k retorna uma solução viável para o problema original, i.e., inteira ($\underline{z}^k = \bar{z}^k$), então o nó k pode ser amadurecido; e
- **Inviabilidade:** se a relaxação é inviável, então não existe solução viável com o prefixo corrente, portanto todas essas combinações podem ser eliminadas.

Em todos esses casos a árvore de *branch-and-bound* não será expandida abaixo do nó corrente, ou seja, a árvore de busca é podada e o nó corrente é amadurecido.

Todos os nós que ainda não foram ramificados e que não foram amadurecidos são nós ativos, ou seja, são aqueles cujos ramos podem conter a solução ótima do problema de programação inteira.

Algoritmo do método *branch-and-bound*

Considere um problema P^k correspondente a um nó na árvore de *branch-and-bound* e sua relaxação linear PL^k . Além disso, considere a seguinte notação:

- $F(P^k)$: região factível do problema P^k ;
- $F(PL^k)$: região factível do problema PL^k ;
- \underline{z}^k : valor ótimo do problema P^k (limitante inferior de z);
- \bar{z}^k : valor ótimo do problema PL^k (limitante superior de z);
- x^* : melhor solução encontrada até o momento (solução incumbente); e
- z^* : valor de x^* .

A seguir é apresentado um algoritmo básico do método *branch-and-bound*. O nó 0 da árvore de busca corresponde ao problema original de programação inteira P . Os nós ativos são armazenados em uma lista L .

<i>Passo 0</i> (Inicialização): Faça $\bar{z} = \infty$, $z^* = -\infty$, $x^* = \emptyset$, $L = \{P\}$
<i>Passo 1</i> (Seleção de nó): Selecione o nó ativo k , associado ao problema P^k , da lista de nós ativos. Se a lista estiver vazia, vá para o <i>Passo 6</i> .
<i>Passo 2</i> (Poda por Inviabilidade): Se a região factível de PL^k for vazia, vá para o <i>Passo 1</i> .
<i>Passo 3</i> (Poda por Otimalidade): Se o valor \bar{z}^k da solução ótima de PL^k é tal que $\bar{z}^k \leq z^*$, vá para o <i>Passo 1</i> .
<i>Passo 4</i> (Poda por Dominância): Se a solução ótima \bar{x}_k de PL^k é inteira com valor \underline{z}^k , e se $\bar{z}^k > z^*$, atualize x^* e z^* . Elimine os nós ativos k da lista L , tais que $\bar{z}^k \leq z^*$, e volte para o <i>Passo 1</i> .
<i>Passo 5</i> (Ramificação): Selecione uma variável da solução ótima \bar{x}_k de PL^k com valor não inteiro e divida e divida P^k em dois problemas. Adicione estes problemas à lista L e vá para o <i>Passo 1</i> .
<i>Passo 6</i> (Fim): Se $z^* = -\infty$, não existe solução factível; caso contrário, a solução incumbente x^* é a solução ótima.

Estratégias de busca

Considere uma árvore de *branch-and-bound* com nós ativos. A questão consiste em escolher o próximo nó a ser examinado. Existem duas alternativas: regras *a priori*, que determinam previamente a ordem de escolha dos nós, e regras adaptativas, que determinam o nó a partir de informações dos nós ativos.

Entre as regras *a priori*, destacam-se as seguintes estratégias:

- **Profundidade (*Depth First Search*):** “mergulha” na árvore a fim de encontrar uma solução inteira (limitante primal) rapidamente. Uma vantagem dessa estratégia é que ela consome menos memória. E uma desvantagem dessa estratégia é que ela não garante encontrar a melhor solução, considerando a melhor solução como aquela que se encontra mais próxima da raiz, ou seja, que requer o menor número de operações para ser alcançada; e
- **Largura (*Breadth First Search*):** percorre todos os nós de cada nível de *branching*. Uma vantagem dessa estratégia é que ela mantém equilíbrio de nós ativos entre os ramos, permitindo manter nós ativos promissores. E uma desvantagem dessa estratégia é que, em geral, ela consome muita memória.

Já entre as regras adaptativas, destacam-se as seguintes estratégias:

- ***Best Bound (Best First Search)*:** os nós ativos são mantidos em uma fila de prioridades, e explora-se sempre o nó com melhor limitante dual. O objetivo desta estratégia é minimizar o número de nós explorados, uma vez que nunca se visitam nós que poderiam ser amadurecidos por dominância. Uma desvantagem dessa estratégia é que ela consome muita memória, e geralmente degenera para a busca em largura; e
- ***Depth First Search with Best Backtracking*:** é um *mix* entre profundidade e *best bound*. A ideia consiste em executar busca em profundidade até que uma folha seja encontrada. Neste ponto, efetuar um *backtracking* até o nó com melhor limite dual no percurso. Em termos de memória é mais eficiente do que *best bound*, mas é menos eficiente do que profundidade, pois, em geral, também consome muita memória.

4.5 Softwares

Existem hoje diversos *softwares* comerciais com *solver* de otimização para programação inteira mista como IBM[®] CPLEX[®] Optimizer, FICO[®] Xpress Optimizer, Gurobi Optimizer, entre outros. Dentre os *softwares* listados, o FICO[®] Xpress Optimizer foi escolhido para ser utilizado neste trabalho devido ao maior contato com o *software* e facilidade de uso.

5 OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS

5.1 Modelo Proposto

O modelo proposto neste trabalho foi baseado no modelo matemático apresentado por Guirardello e Swaney (2005) e consiste em um modelo de PIM composto por: uma função objetivo de minimização do custo total do *layout*, quanto ao posicionamento de equipamentos em um *layout* em múltiplos pisos, e restrições de não-sobreposição e distância mínima visando, principalmente, aspectos de segurança, manutenção, operação e a circulação de pessoas.

A seguir, são estabelecidas as premissas para o modelo de otimização do posicionamento de equipamentos:

- O modelo é tridimensional (3D);
- Os equipamentos são representados por sólidos retangulares 3D;
- Os bocais para conexão de tubulações estão posicionados no interior desses sólidos retangulares;
- A distância entre dois pontos é dada pela distância de Manhattan:

$$d = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| + |z_i - z_j|;$$

- Os equipamentos podem ser rotacionados e refletidos no plano x - y de oito maneiras diferentes, mas não pode ser rotacionados nos planos x - z e y - z (ver Figura 5.1); e
- Cada par de equipamentos pode ser colocado em seis posições relativas diferentes:

$$x_i > x_j \text{ ou } x_j > x_i \text{ ou } y_i > y_j \text{ ou } y_j > y_i \text{ ou } z_i > z_j \text{ ou } z_j > z_i.$$

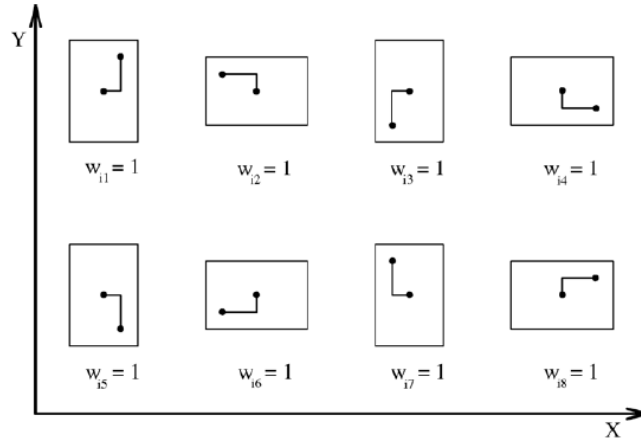


Figura 5.1 - Possíveis rotações e reflexões no plano x - y .

Fonte: Guirardello e Swaney, 2005.

5.1.1 Função Objetivo

A função objetivo inclui o custo do tamanho do *layout*, o custo de suportes de cada equipamento (para equipamento elevado) e o custo das tubulações que interligam os equipamentos, conforme Eq. (5.1).

$$\min \quad C^{area} \cdot X \cdot Y + \sum_{i=1}^{N^{cp}} c_i^s + \sum_{k=1}^{N^p} C_k^p [l_k^{x+} + l_k^{x-} + l_k^{y+} + l_k^{y-} + l_k^{z+} + l_k^{z-}] \quad (5.1)$$

X, Y, Z, c_i^s

$l_k^{x+}, l_k^{x-}, l_k^{y+}, l_k^{y-}, l_k^{z+}, l_k^{z-}$

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

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

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

Obs.: os índices só variam no subscrito, os sobreescritos são mnemônicos e apenas ajudam a descrever e identificar as variáveis e os parâmetros do modelo.

O custo do tamanho do *layout* é proporcional a sua área, este é dado por $c^{area} = C^{area} \cdot X \cdot Y$, onde o módulo é representado por um retângulo 3D de dimensões X, Y e Z , e C^{area} é o custo unitário de ocupação de área, em $\$/m^2$. No entanto, isso resulta em um modelo não linear. De modo a substituir o modelo não linear por um modelo linear, foram analisadas as especificidades da aplicação onde se constatou que a

largura dos módulos varia muito pouco. Este é definido pela largura do *FPSO* e como, normalmente, este valor é conhecido pode-se definir a largura do módulo como um dado de entrada para o programa.

O custo de suportes de cada equipamento é dado pela seguinte equação linear por partes, função da altura do equipamento:

$$c_i^s = C_{is}^{sa}(z_i \cdot H + E_i^e) + C_{is}^{sb}$$

onde $C_{is}^{sa} = \text{Peso}_i \cdot a_s$ e $C_{is}^{sb} = \text{Peso}_i \cdot b_s$, Peso_i é o peso cheio de cada equipamento e a_s e b_s são coeficientes de custo para os suportes. Uma modificação importante do modelo proposto neste trabalho, em relação ao modelo de Guirardello e Swaney (2005), foi que as equações originais de C_{is}^{sa} e C_{is}^{sb} consideravam a área da base do equipamento e não o seu peso, isso permitia que um equipamento de grande peso, mas de pequena área de base (uma torre, por exemplo), fosse posicionado em altura elevada, o que resultaria num alto custo de suportes. A altura do suporte foi escolhida como a altura da base de cada equipamento ($z_i \cdot H + E_i^e$), onde z_i é a posição vertical de cada equipamento, H é a altura entre pisos do *layout* em múltiplos pisos e E_i^e é a elevação mínima vertical de cada equipamento. Outra modificação importante do modelo proposto neste trabalho foi que a posição vertical z_i passou a considerar a elevação da base de cada equipamento e não a do seu centro, além disso, z_i foi considerado como uma variável inteira definindo um domínio discreto para a posição vertical do equipamento caracterizado pela altura entre pisos H , definida pelo usuário.

O custo das tubulações que interligam os equipamentos é dado pelo custo por unidade de comprimento de cada tubulação C_k^p , em \$/m, multiplicado pela distância de Manhattan l_k entre os bocais:

$$l_k = |x_p^n - x_q^n| + |y_p^n - y_q^n| + |z_p^n - z_q^n|$$

onde p e q são os bocais que estão conectados pela tubulação k , e (x_p^n, y_p^n, z_p^n) e (x_q^n, y_q^n, z_q^n) são a posição dos bocais. É importante salientar que a distância de Manhattan não oferece o comprimento real da tubulação, porém é uma aproximação válida utilizada em etapas iniciais de projeto (quando o roteamento das tubulações ainda não foi realizado), fornecendo uma boa estimativa do comprimento da tubulação.

As posições dos bocais são dadas por F_p^x, F_p^y, F_p^z , que são as posições relativas do bocal p em relação ao centro do equipamento. As oito possíveis rotações de cada

equipamento no plano x - y são representadas pela variável binária w_{il} , como mostrado na Figura 5.1. E, as seis possíveis posições relativas entre cada par de equipamentos são representadas pelas variáveis binárias $(w_{ij}^x, w_{ij}^y, w_{ij}^z)$.

5.1.2 Restrições

A função objetivo da Eq. (5.1) é sujeita às seguintes restrições:

- Eq. (5.2) - calcula o custo de suportes de cada equipamento i através de uma função linear por partes (4 segmentos):

$$c_i^s \geq C_{is}^{sa}(z_i \cdot H + E_i^e) + C_{is}^{sb} \quad (5.2)$$

$$i = 1, \dots, N^{cp}$$

$$s = 1, \dots, 4$$

- Eq. (5.3) - calcula a dimensão X (comprimento) do *layout*, a partir da posição máxima na direção x de todos os equipamentos:

$$X \geq x_i + \frac{1}{2}a_i(w_{i1} + w_{i3} + w_{i5} + w_{i7}) + \frac{1}{2}b_i(w_{i2} + w_{i4} + w_{i6} + w_{i8}) \quad (5.3)$$

$$i = 1, \dots, N^{cp}$$

- Eq. (5.4) - calcula a dimensão Y (largura) do *layout*, a partir da posição máxima na direção y de todos os equipamentos:

$$Y \geq y_i + \frac{1}{2}b_i(w_{i1} + w_{i3} + w_{i5} + w_{i7}) + \frac{1}{2}a_i(w_{i2} + w_{i4} + w_{i6} + w_{i8}) \quad (5.4)$$

$$i = 1, \dots, N^{cp}$$

- Eq. (5.5) - calcula a dimensão Z (altura) do *layout*, a partir da posição máxima na direção z de todos os equipamentos:

$$Z \geq z_i \cdot H + c_i + E_i^e \quad (5.5)$$

$$i = 1, \dots, N^{cp}$$

- Eqs. (5.6 e 5.7) - calculam o limite inferior das posições centrais x_i e y_i de cada equipamento, respectivamente:

$$x_i \geq \frac{1}{2}a_i(w_{i1} + w_{i3} + w_{i5} + w_{i7}) + \frac{1}{2}b_i(w_{i2} + w_{i4} + w_{i6} + w_{i8}) \quad (5.6)$$

$$i = 1, \dots, N^{cp}$$

$$y_i \geq \frac{1}{2} b_i (w_{i1} + w_{i3} + w_{i5} + w_{i7}) + \frac{1}{2} a_i (w_{i2} + w_{i4} + w_{i6} + w_{i8}) \quad (5.7)$$

$$i = 1, \dots, N^{cp}$$

- Eqs. (5.8, 5.9 e 5.10) – calculam a distância mínima entre cada par de equipamentos $d_{ij}^x, d_{ij}^y, d_{ij}^z$, tanto para evitar a sobreposição de equipamentos quanto para fornecer as distâncias mínimas de segurança.

$$d_{ij}^x \geq \frac{1}{2} a_i (w_{i1} + w_{i3} + w_{i5} + w_{i7}) + \frac{1}{2} b_i (w_{i2} + w_{i4} + w_{i6} + w_{i8})$$

$$+ \frac{1}{2} a_j (w_{j1} + w_{j3} + w_{j5} + w_{j7}) + \frac{1}{2} b_j (w_{j2} + w_{j4} + w_{j6} + w_{j8})$$

$$+ [D^h + M_{ij}] w_{ij}^x - M_{ij} \quad (5.8)$$

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

$$d_{ij}^y \geq \frac{1}{2} b_i (w_{i1} + w_{i3} + w_{i5} + w_{i7}) + \frac{1}{2} a_i (w_{i2} + w_{i4} + w_{i6} + w_{i8})$$

$$+ \frac{1}{2} b_j (w_{j1} + w_{j3} + w_{j5} + w_{j7}) + \frac{1}{2} a_j (w_{j2} + w_{j4} + w_{j6} + w_{j8})$$

$$+ [D^h + M_{ij}] w_{ij}^y - M_{ij} \quad (5.9)$$

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

$$d_{ij}^z \geq \left[D^v + \frac{1}{2} c_i + \frac{1}{2} c_j \right] w_{ij}^z \quad (5.10)$$

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

- Eqs. (5.11, 5.12 e 5.13) - calculam a distância máxima entre cada par de equipamentos $d_{ij}^x, d_{ij}^y, d_{ij}^z$. Estas restrições são necessárias para evitar que ambos d_{ij}^x e d_{ji}^x sejam diferentes de zero para o mesmo par de equipamentos i e j , isso faria com que as distâncias entre pares de equipamentos calculadas nas Eq. (5.14, 5.15 e 5.16) violassem o requisito de distância mínima.

$$d_{ij}^x \leq M(1 - w_{ji}^x) \quad (5.11)$$

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

$$d_{ij}^y \leq M(1 - w_{ji}^y) \quad (5.12)$$

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

$$d_{ij}^z \leq M(1 - w_{ji}^z) \quad (5.13)$$

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

Obs.: O valor de M afeta a distância máxima entre pares de equipamentos. Este será discutido em mais detalhes no item 5.2.

- Eqs. (5.14, 5.15 e 5.16) - conectam as posições centrais dos equipamentos às distâncias entre cada par de equipamentos $d_{ij}^x, d_{ij}^y, d_{ij}^z$. Nota-se que se d_{ij} e d_{ji} em qualquer direção forem ambas diferentes de zero, a diferença entre as posições centrais será a diferença entre as duas.

$$x_i - x_j - d_{ij}^x + d_{ji}^x = 0 \quad (5.14)$$

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

$$y_i - y_j - d_{ij}^y + d_{ji}^y = 0 \quad (5.15)$$

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

$$z_i \cdot H + \frac{1}{2}c_i + E_i^e - z_j \cdot H - \frac{1}{2}c_j - E_j^e - d_{ij}^z + d_{ji}^z = 0 \quad (5.16)$$

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

- Eqs. (5.17, 5.18 e 5.19) - calculam a posição dos bocais, nas três direções x , y e z , respectivamente:

$$x_p^n = x_i + F_p^x \cdot \frac{1}{2}a_i(+w_{i1} - w_{i3} + w_{i5} - w_{i7}) + F_p^y$$

$$\cdot \frac{1}{2}b_i(-w_{i2} + w_{i4} - w_{i6} + w_{i8}) \quad (5.17)$$

$$p = 1, \dots, N^{nz}, \quad i = i(p)$$

$$\begin{aligned}
y_p^n &= y_i + F_p^y \cdot \frac{1}{2} a_i (+w_{i1} - w_{i3} - w_{i5} + w_{i7}) + F_p^y \\
&\quad \cdot \frac{1}{2} b_i (+w_{i2} - w_{i4} - w_{i6} + w_{i8}) \quad (5.18) \\
p &= 1, \dots, N^{nz}, \quad i = i(p)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
z_p^n &= z_i \cdot H + \frac{1}{2} c_i + E_i^e + F_p^z \cdot \frac{1}{2} c_i \quad (5.19) \\
p &= 1, \dots, N^{nz}, \quad i = i(p)
\end{aligned}$$

- Eqs. (5.20, 5.21 e 5.22) - relacionam a posição dos bocais ao comprimento das tubulações (utilizando a distância de Manhattan), nas três direções x , y e z , respectivamente:

$$\begin{aligned}
x_p^n - x_q^n - l_k^{x+} + l_k^{x-} &= 0 \quad (5.20) \\
k &= 1, \dots, N^{pi}, \quad p = k^o(k), \quad q = k^d(k)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_p^n - y_q^n - l_k^{y+} + l_k^{y-} &= 0 \quad (5.21) \\
k &= 1, \dots, N^{pi}, \quad p = k^o(k), \quad q = k^d(k)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
z_p^n - z_q^n - l_k^{z+} + l_k^{z-} &= 0 \quad (5.22) \\
k &= 1, \dots, N^{pi}, \quad p = k^o(k), \quad q = k^d(k)
\end{aligned}$$

- Eq. (5.23) - calcula a rotação dos equipamentos. Esta equação determina que apenas uma rotação seja escolhida para cada equipamento i :

$$\begin{aligned}
\sum_{l=1}^8 w_{il} &= 1 \quad (5.23) \\
i &= 1, \dots, N^{cp}
\end{aligned}$$

- Eq. (5.24) - calcula a posição relativa entre os equipamentos. Esta equação determina que apenas uma posição relativa seja escolhida para cada par de equipamentos i e j :

$$\begin{aligned}
w_{ij}^x + w_{ji}^x + w_{ij}^y + w_{ji}^y + w_{ij}^z + w_{ji}^z &= 1 \quad (5.24) \\
i &= 1, \dots, N^{cp} - 1, \quad j = i + 1, \dots, N^{cp}
\end{aligned}$$

- Eqs. (5.25, 5.26, 5.27, 5.28, 5.29 e 5.30) - definem as condições de contorno das variáveis de decisão contínuas ou inteiras.

$$X, Y, Z \geq 0 \quad (5.25)$$

$$C_i^s \geq 0 \quad (5.26)$$

$$i = 1, \dots, N^{cp}$$

$$l_k^{x+}, l_k^{x-}, l_k^{y+}, l_k^{y-}, l_k^{z+}, l_k^{z-} \geq 0 \quad (5.27)$$

$$k = 1, \dots, N^{pi}$$

$$x_i, y_i \geq 0 \text{ e } z_i \in \mathbb{Z} \quad (5.28)$$

$$i = 1, \dots, N^{cp}$$

$$x_p^n, y_p^n, z_p^n \geq 0 \quad (5.29)$$

$$p = 1, \dots, N^{nz}$$

$$d_{ij}^x, d_{ij}^y, d_{ij}^z \geq 0 \quad (5.30)$$

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

- Eqs. (5.31 e 5.32) - apresentam o domínio das variáveis binárias, relacionadas à rotação e à posição relativa entre os equipamentos, respectivamente.

$$w_{il} \in \{0,1\} \quad (5.31)$$

$$i = 1, \dots, N^{cp}$$

$$l = 1, \dots, 8$$

$$w_{ij}^x, w_{ij}^y, w_{ij}^z \in \{0,1\} \quad (5.32)$$

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

onde,

$$M_{ij} = \frac{1}{2} [\max\{a_i, b_i\} + \max\{a_j, b_j\}] \quad (5.33)$$

Tabela 5.1 - Dimensões e peso dos equipamentos.

i	Nome	Comprimento a_i [m]	Largura b_i [m]	Altura c_i [m]	Peso _{i} [t]
1	<i>Oil Dehydrator Recirculation Water Pump</i>	4,30	3,70	2,50	5,084
2	<i>Test Separator Pump</i>	6,60	4,70	3,00	15,430
3	<i>Oil/Oil Pre-Heater Production Heater</i>	22,50	6,20	5,20	110,734
4	<i>Dilution Water Heater</i>	2,60	3,80	3,60	0,534
5	<i>Test Heater</i>	10,50	2,00	3,00	7,891
6	<i>Oil Cooler</i>	6,50	4,20	3,00	9,152
7	<i>Free Water Separator</i>	25,00	6,00	8,00	311,560
8	<i>Test Separator</i>	12,90	3,50	6,30	95,800
9	<i>Pre-Oil Dehydrator/Pre-Oil Dehydrator Degasser Oil Dehydrator/Oil Dehydrator Degasser</i>	18,00	12,00	11,00	893,353
10	<i>Fiscal Metering Skid</i>	11,00	3,50	3,50	15,50

Os equipamentos foram agrupados em pequenos módulos juntamente com seus periféricos, tubulações e espaço requerido para operação e manutenção. A Figura 5.2 ilustra o pequeno módulo formado pelo equipamento *Oil Dehydrator Recirculation Water Pump* (1). Além disso, os equipamentos *Oil/Oil Pre-Heater* e *Production Heater* foram posicionados um a frente do outro e foram considerados como um único equipamento (3) com o objetivo de economizar espaço visto que, deste modo, estes poderiam compartilhar a mesma área para operação/manutenção. Por requisito físico, os equipamentos *Pre-Oil Dehydrator Degasser* e *Oil Dehydrator Degasser* foram posicionados acima do *Pre-Oil Dehydrator* e do *Oil Dehydrator*, respectivamente. Além disso, esses dois conjuntos foram posicionados lado a lado como um único equipamento (9). O resultado foi um conjunto de dez equipamentos ou pequenos módulos a serem posicionados, apresentado na Tabela 5.1. A elevação mínima vertical foi definida em zero para todos os equipamentos ($E_i^e = 0,00\text{ m}$).

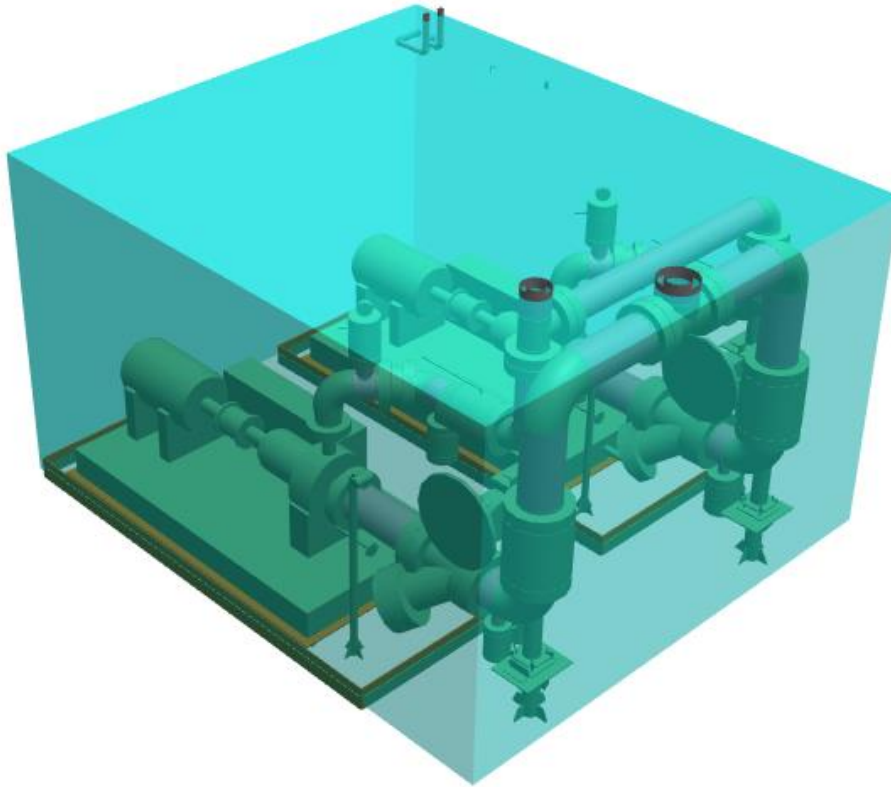


Figura 5.3 - Pequeno módulo formado pelo equipamento *Oil Dehydrator Recirculation Water Pump*.

A Tabela 5.2, a seguir, mostra a posição relativa dos bocais, F_p^x , F_p^y e F_p^z , em relação ao centro de cada equipamento.

Tabela 5.2 - Posição relativa dos bocais.

<i>Componente i(p)</i>	<i>Bocal p</i>	F_p^x	F_p^y	F_p^z
1	1	0,09	-0,65	-0,54
	2	0,09	0,65	-0,54
	3	-0,11	-0,65	-0,18
	4	-0,11	0,65	-0,18
2	5	-0,29	-0,66	-0,48
	6	-0,29	0,66	-0,48
	7	-0,42	-0,66	-0,18
	8	-0,42	0,66	-0,18
3	9	0,30	-0,32	-0,57
	10	0,30	0,32	-0,57
	11	0,30	-0,32	0,90
	12	0,30	0,32	0,90
	13	0,62	-0,32	-0,57
	14	0,62	0,32	-0,57
	15	-0,80	-0,36	-0,46
	16	-0,55	-0,36	-0,46
	17	-0,68	-0,36	-0,01
	18	-0,80	0,36	-0,46
	19	-0,55	0,36	-0,46
	20	-0,68	0,36	-0,01
4	21	0,29	-0,25	-0,92
	22	0,29	0,54	-0,92
5	23	-0,32	0,00	0,71
6	24	0,25	-0,15	0,63
	25	0,25	0,15	-0,77
7	26	0,89	0,00	0,58
	27	-0,57	0,00	0,51
8	28	0,92	0,00	0,55
	29	-0,61	0,00	-0,4
9	30	0,78	-0,53	0,78
	31	0,00	-0,53	0,15
	32	0,78	0,53	0,78
	33	0,00	0,53	-0,81
10	34	0,79	0,14	0,06

A Tabela 5.3, a seguir, apresenta as informações relativas às tubulações. As informações de custo das tubulações individuais são confidenciais, portanto, os valores apresentados na tabela foram multiplicados por um fator de conversão.

Tabela 5.3 - Dados das tubulações para a otimização do *layout*.

<i>Tubulação k</i>	<i>Bocal k^o(k)</i>	<i>Bocal k^d(k)</i>	<i>C_k^p [\$m]</i>
1	33	1	10,00
2	33	2	10,00
3	3	26	5,77
4	4	26	5,77
5	27	9	27,97
6	27	10	27,97
7	11	15	26,26
8	11	16	26,26
9	12	18	26,26
10	12	19	26,26
11	17	30	26,26
12	20	30	26,26
13	31	33	26,29
14	23	28	11,64
15	29	5	19,41
16	29	6	19,41
17	7	30	15,87
18	8	30	15,87
19	13	24	17,51
20	14	24	17,51
21	21	32	6,85
22	22	32	6,85
23	25	34	19,07

Para obter os fatores de custo unitário para os suportes do equipamento i , C_{is}^{sa} e C_{is}^{sb} , foram consideradas as correlações apresentadas na Tabela 5.4, modificadas de Guthrie (1974, *apud* GUIRARDELLO; SWANEY, 2005), que, neste trabalho, consideram o peso do equipamento e não a sua área da base.

Tabela 5.4 - Dados de custo unitário para os suportes para a otimização do *layout*.

Nome	Valor	Unidade
$C_{i1}^{sa}/Peso_i$	62,8765	\$/t.m
$C_{i2}^{sa}/Peso_i$	95,3989	\$/t.m
$C_{i3}^{sa}/Peso_i$	115,9964	\$/t.m
$C_{i4}^{sa}/Peso_i$	140,9302	\$/t.m
$C_{i1}^{sb}/Peso_i$	0,0000	\$/t
$C_{i2}^{sb}/Peso_i$	-99,1281	\$/t
$C_{i3}^{sb}/Peso_i$	-224,6904	\$/t
$C_{i4}^{sb}/Peso_i$	-528,6832	\$/t

O custo por unidade de área C^{area} considerado neste trabalho foi de 50,0 \$/m². Este valor foi adotado de modo a ser coerente com o custo por unidade de perímetro de 298,43 \$/m, apresentado por Guirardello e Swaney (2005).

O valor de M afeta a distância máxima entre pares de equipamentos (Eqs. 5.11 a 5.13). Embora seu valor possa ser arbitrado, este não pode ser pequeno demais para não cortar algum *layout* viável e nem grande demais para não tornar o modelo mal condicionado. Em concordância com o trabalho de Guirardello e Swaney (2005), o valor de M foi definido em 51,0.

As distâncias mínimas entre equipamentos D^h , para distância horizontal, e D^v , para distância vertical, foram definidas 1,5 m e 1,0 m, respectivamente. A distância D^h representa a dimensão mínima para o trânsito de pessoas e materiais dentro do módulo e a distância D^v representa a dimensão mínima para o posicionamento de viga estrutural entre pisos. A altura entre elevações H foi definida em 6,0 m e a largura do módulo Y foi definida em 20,0 m, de acordo com o que foi observado na maioria dos módulos da P-76.

Devido às especificidades do problema de posicionamento de equipamentos, as seguintes restrições adicionais foram inseridas ao modelo:

- Para atendimento do *NPSH (Net Positive Suction Head)* requerido das bombas, foram adicionadas as seguintes restrições: $z_1 \leq z_9$, *Oil Dehydrator Recirculation Water Pump* deve estar em elevação igual ou inferior ao *Pre-Oil Dehydrator/Oil Dehydrator*; e $z_2 \leq z_8$, *Test Separator Pump* deve estar em elevação igual ou inferior ao *Test Separator*;
- Devido aos movimentos os quais o *FPSO* é submetido, é requerido que os equipamentos *Free Water Separator*, *Test Separator* e *Pre-Oil Dehydrator/Oil Dehydrator* sejam posicionados paralelamente ao eixo popa-proa do navio, deste modo, as variáveis $w_{7,(2,4,6,8)}$, $w_{8,(2,4,6,8)}$ e $w_{9,(2,4,6,8)}$ foram fixadas em 0; e
- Devido a limitações estruturais durante o içamento do módulo, o comprimento máximo X foi definido em 35,0 m.

5.3 Resultados

O problema de otimização do posicionamento de equipamentos foi então modelado na linguagem FICO® Xpress Mosel 4.8.3 e resolvido através do *branch-and-bound* padrão do *software* FICO® Xpress Optimizer 8.5 64 bits (*branch-and-bound* automático com geração automática de cortes e heurísticas).

O modelo, com 980 variáveis e 1071 restrições, foi resolvido de maneira ótima (intervalo entre os limitantes inferiores e superiores igual a zero). O *layout* obtido tem dimensões 33,7 x 20,0 x 17,2 m (C x L x A) e possui 3 elevações: 0 m, 6 m e 12 m. O custo total do *layout* foi de \$ 229.799,00, sendo \$ 33.700,00 para custo de ocupação de área, \$ 137.215,00 para o custo de suportes dos componentes e \$ 58.883,00 para o custo de tubulações. O tempo de CPU foi de 196s para um computador com Windows 10, processador Intel® Core™ i5-5200U CPU @ 2.20 GHz e memória RAM de 6,00 GB. Os principais resultados da otimização são apresentados na sequência.

A Tabela 5.5, a seguir, apresenta as dimensões do módulo e o custo de ocupação de área do *layout*, que é dado por $C^{area} \cdot X \cdot Y$.

Tabela 5.5 – Dimensões do modulo e custo de ocupação de área.

X [m]	Y [m]	Z [m]	C^{area} [\$]
33,7	20	17,2	33700,00

A Tabela 5.6, a seguir, mostra a posição e o custo de suportes dos componentes do *layout*. O custo total de suportes dos componentes, dado por $\sum_{i=1}^{N^{cp}} c_i^s$, foi de \$ 137.215,00.

Tabela 5.6 – Posição e custo dos suportes dos componentes.

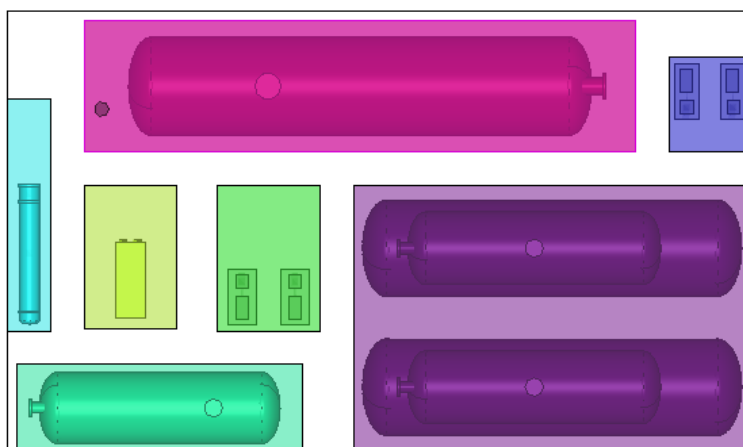
i	Nome	x_i [m]	y_i [m]	z_i [m]	c_i^s [\$]
1	Oil Dehydrator Recirculation Water Pump	31,85	15,75	0	0,00
2	Test Separator Pump	11,85	8,80	0	0,00
3	Oil/Oil Pre-Heater Production Heater	12,14	10,63	2	129256,00
4	Dilution Water Heater	18,09	3,98	2	623,32
5	Test Heater	1,00	10,75	0	0,00
6	Oil Cooler	5,60	8,85	0	0,00
7	Free Water Separator	16,00	16,60	0	0,00
8	Test Separator	6,91	2,00	0	0,00
9	Pre-Oil Dehydrator/Pre-Oil Dehydrator Degasser Oil Dehydrator/Oil Dehydrator Degasser	24,70	6,10	0	0,00
10	Fiscal Metering Skid	8,70	9,90	1	7335,61

A Tabela 5.7, a seguir, mostra o comprimento e custo das tubulações (utilizando a distância de Manhattan). Para calcular o custo da tubulação k , basta multiplicar o seu comprimento total, l_k [m], pelo seu custo por unidade de comprimento, C_k^p [\$/m]. O custo total de tubulações do *layout*, dado por $\sum_{k=1}^{N^{pi}} C_k^p \cdot l_k$, foi de \$ 58.883,60. As informações de custo das tubulações individuais são confidenciais, portanto, os valores apresentados na tabela foram multiplicados por um fator de conversão.

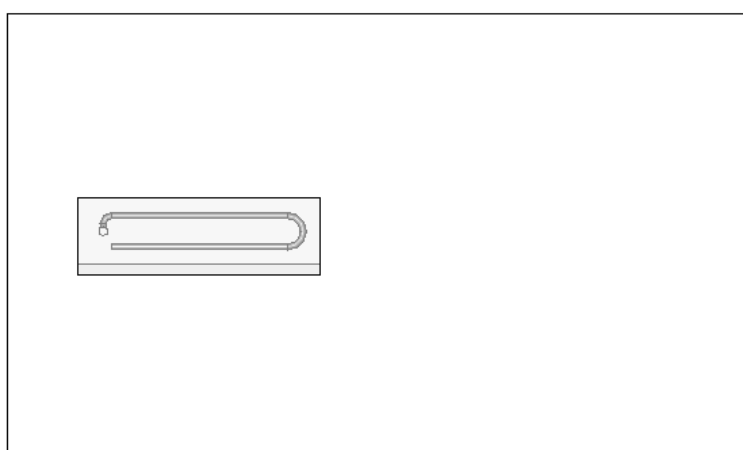
Tabela 5.7 - Comprimento e custo das tubulações (utilizando a distancia de Manhattan).

Tubulação k	l_k^{x+} [m]	l_k^{x-} [m]	l_k^{y+} [m]	l_k^{y-} [m]	l_k^{z+} [m]	l_k^{z-} [m]	l_k [m]	c_k^p [\$]
1	0,000	6,100	0,000	12,300	0,502	0,000	18,902	189,02
2	0,000	8,200	0,000	12,300	0,502	0,000	21,002	210,02
3	3,660	0,000	0,000	0,950	0,000	5,370	9,980	57,61
4	5,760	0,000	0,000	0,950	0,000	5,370	12,080	69,73
5	0,000	0,000	6,950	0,000	0,000	11,152	18,102	506,31
6	0,000	0,000	4,982	0,000	0,000	11,152	16,134	451,25
7	0,000	9,533	0,146	0,000	3,554	0,000	13,232	347,53
8	0,000	12,314	0,146	0,000	3,554	0,000	16,014	420,58
9	0,000	9,533	0,000	0,146	3,554	0,000	13,232	347,53
10	0,000	12,314	0,000	0,146	3,554	0,000	16,014	420,58
11	2,038	0,000	0,254	0,000	4,772	0,000	7,064	185,53
12	2,038	0,000	2,514	0,000	4,772	0,000	9,324	244,88
13	6,995	0,000	6,300	0,000	0,000	3,463	16,758	440,53
14	0,000	0,000	7,055	0,000	0,000	2,316	9,370	109,04
15	0,000	2,200	0,000	6,150	1,350	0,000	9,700	188,23
16	0,200	0,000	0,000	6,150	1,350	0,000	7,699	149,41
17	0,000	4,655	0,000	1,500	0,000	8,863	15,018	238,31
18	0,000	7,055	0,000	1,500	0,000	8,863	17,418	276,39
19	0,000	0,081	0,000	0,000	10,671	0,000	10,752	188,24
20	0,000	0,081	1,968	0,000	10,671	0,000	12,720	222,70
21	0,000	0,000	1,500	0,000	2,337	0,000	3,837	26,29
22	0,000	0,000	0,000	0,000	2,337	0,000	2,337	16,01
23	1,566	0,000	0,000	0,000	0,000	7,500	9,066	172,86

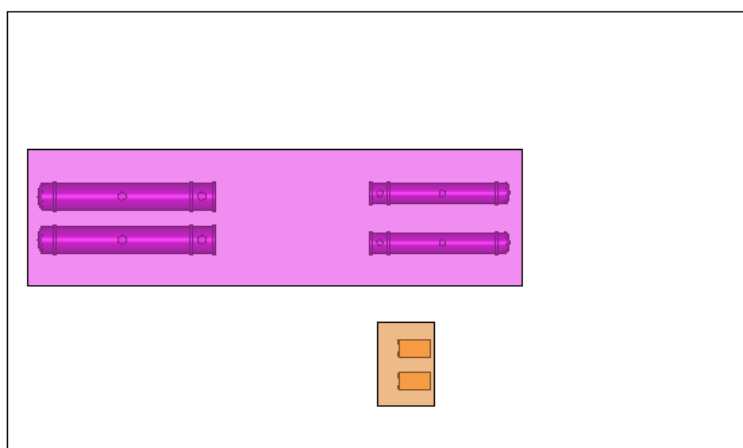
A partir dos resultados obtidos, utilizou-se o *software* Bentley MicroStation V8i para a elaboração dos desenhos de *layout* apresentados a seguir.



(a) Primeiro piso. El. 0 m.



(b) Segundo Piso. El. 6 m.



(c) Terceiro Piso. El. 12 m.

Figura 5.4 - Resultado da otimização do *layout* de equipamentos (vista de planta).

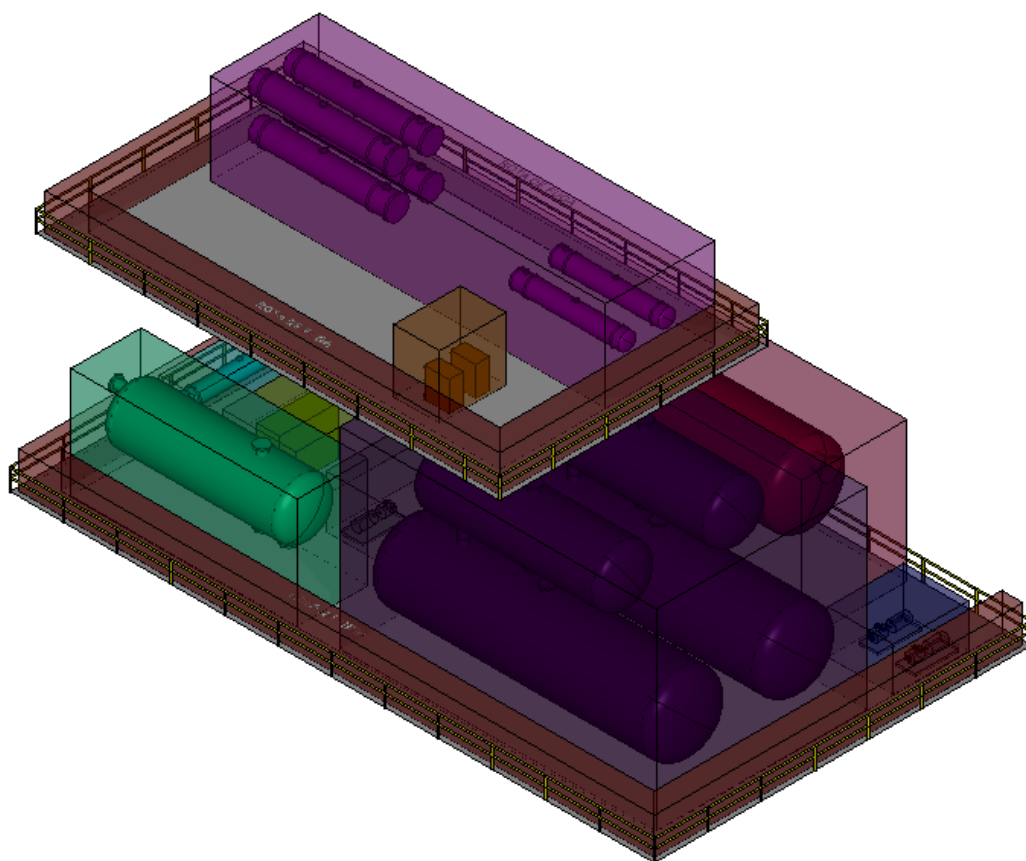


Figura 5.5 - Resultado da otimização do *layout* de equipamentos (vista isométrica)⁴.

5.4 Discussão

O *layout* de equipamentos obtido neste trabalho foi comparado ao *layout* de equipamentos adotado no módulo M-10 - *Oil Processing and Water Treatment* da P-76, que possui dimensões de 31,5 x 20,0 x 14,0 m (C x L x A) e é dividido em 2 elevações: 0 m e 6 m. O custo total do *layout* (utilizando os mesmos parâmetros considerados na otimização) é de \$ 313.472,60, sendo \$ 31.500,00 para custo de ocupação de área, \$ 200.855,21 para o custo de suportes e \$ 81.117,39 para o custo de tubulações. Na Tabela 5.8, os resultados do *layout* obtido pelo modelo de otimização são comparados com os dados do *layout* de equipamentos adotado no M-10 da P-76.

⁴ As rotas de fuga e os guarda-corpos não fazem parte da otimização.

Tabela 5.8 - Comparação do *layout* obtido pelo modelo de otimização com o *layout* de equipamentos adotado no M-10 da P-76.

Descrição	Real	Modelo	%
Área do <i>layout</i> [m ²]	630	674	6,98%
Comprimento do <i>layout</i> [m]	31,5	33,7	6,98%
Altura do <i>layout</i> [m]	14 (2 elevações)	17,2 (3 elevações)	22,86%
Custo de ocupação de área [\$]	31500	33700	6,98%
Custo de suportes [\$]	200855	137215	-31,68%
Custo total de tubulações [\$]	81117	58883	-27,41%
Custo total do <i>layout</i> [\$]	313473	229799	-26,69%

Portanto, o *layout* de equipamentos obtido neste trabalho tem custo 26,7% menor em relação ao *layout* de equipamentos adotado no M-10 da P-76. Apesar de o *layout* de equipamentos obtido neste trabalho ser mais alto que o *layout* de equipamentos adotado neste módulo, o custo de suportes foi 31,7% menor. Isso se deve, pois, neste caso, os equipamentos *Free Water Separator* (7) e *Test Separator* (8), que possuem grande peso, são localizados na segunda elevação do módulo (6 m), enquanto que no *layout* de equipamentos obtido pelo modelo de otimização eles são localizados na primeira elevação do módulo (0 m). Além disso, o modelo de otimização alocou os equipamentos de modo a reduzir o comprimento de tubulações resultando num custo de tubulações 27,4% menor.

6 OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE MÓDULOS

6.1 Modelo Proposto

O modelo proposto neste trabalho foi baseado no modelo matemático apresentado por Murray, Zuo e Smith (2012) e consiste em um modelo de PIM composto por: uma função objetivo, que busca minimizar o custo total de tubulações que interligam os módulos e o custo do tamanho do *layout*, e de uma série de restrições visando o correto posicionamento de módulos em fileiras paralelas separadas por um corredor de largura fixa (*Double Row Layout Problems*).

A seguir, são estabelecidas premissas para o modelo de otimização do posicionamento de equipamentos:

- O modelo é bidimensional (2D);
- Os módulos são representados por retângulos 2D;
- Os módulos são conectados por tubulações de trechos retilíneos que, no caso de módulos posicionados na mesma fileira, correm ao longo do corredor e, no caso de módulos posicionados em fileiras distintas, correm ao longo de e cruzam o corredor; e
- O corredor possui largura fixa diferente de zero.

6.1.1 Função Objetivo

A função objetivo inclui o custo de tubulações que interligam os módulos e o custo do tamanho do *layout*, conforme Eq. (6.1). Estes dois objetivos são incorporados no formato de uma soma linear através de um parâmetro de escala $0 \leq \alpha \leq 1$, de modo que se $\alpha = 1$, o objetivo é minimizar apenas o custo total de tubulações entre módulos e se $\alpha = 0$, o objetivo é minimizar apenas o custo do tamanho do *layout*.

$$\min \alpha \sum_{m=1}^{N^{md}-1} \sum_{n=m+1}^{N^{md}} C^p_{mn} (v_{mn}^+ + v_{mn}^- + L(1 - q_{mn})) + (1 - \alpha) C^{area} A^{total} \quad (6.1)$$

$X_{mr}, Y_{mr}, Z_{rmn}, q_{mn}$
 $C^{total}, A^{total}, A_r^{fileira}$

Obs.: os índices só variam no subscrito, os sobreescritos são mnemônicos e apenas ajudam a descrever e identificar as variáveis e os parâmetros do modelo.

O custo das tubulações, em \$, é dado pelo custo por unidade de comprimento das tubulações que interligam os módulos m e n C^p_{mn} , em \$/m, multiplicado pela distância entre os módulos mais a largura do corredor, caso os módulos m e n estejam em corredores distintos, $(v_{mn}^+ + v_{mn}^- + L(1 - q_{mn}))$, em m.

A área do *layout* A^{total} , em m², é composta pelas áreas das fileiras $A_r^{fileira}$ e pela área do corredor $C^{total}L$, onde L é a largura do corredor e C^{total} é o comprimento total do *layout*. Portanto, o custo do tamanho do *layout* é dado por $C^{area}A^{total}$, onde C^{area} é o custo unitário de ocupação de área, em \$/m².

A variável X_{mr} é contínua e corresponde à posição do centro do módulo m na fileira r . Já $Y_{m,r}$, $Z_{r,m,n}$ e q_{mn} são variáveis binárias tais que $Y_{m,r} = 1$, se o módulo m está na fileira r e $Y_{m,r} = 0$, caso contrário, $Z_{r,m,n} = 1$, se o módulo m está a esquerda do módulo n na fileira r e $Z_{r,m,n} = 0$, caso contrário, e, $q_{mn} = 1$, se os módulos m e n estão na mesma fileira, e $q_{mn} = 0$, caso contrário.

6.1.2 Restrições

A função objetivo da Eq. (6.1) é sujeita às seguintes restrições:

- Eqs. (6.2 e 6.3) - garantem que cada módulo seja alocado em apenas uma fileira.

$$X_{mr} \leq M \cdot Y_{mr} \quad (6.2)$$

$$m = 1, \dots, N^{md}, \quad r = 1, 2$$

$$\sum_{r=1}^2 Y_{mr} = 1 \quad (6.3)$$

$$m = 1, \dots, N^{md}$$

- Eqs. (6.4 e 6.5) - garantem que a folga mínima entre módulos adjacentes seja satisfeita.

$$\frac{A_m Y_{mr} + A_n Y_{nr}}{2} + D \cdot Z_{rnm} \leq X_{mr} - X_{nr} + M(1 - Z_{rnm}) \quad (6.4)$$

$$m = 1, \dots, N^{md} - 1, \quad n = m + 1, \dots, N^{md}, \quad r = 1, 2$$

$$\frac{A_m Y_{mr} + A_n Y_{nr}}{2} + D \cdot Z_{rmn} \leq -X_{mr} + X_{nr} + M(1 - Z_{rmn}) \quad (6.5)$$

$$m = 1, \dots, N^{md} - 1, \quad n = m + 1, \dots, N^{md}, \quad r = 1, 2$$

- Eq. (6.6) - calcula o valor absoluto da distância horizontal entre módulos.

$$\sum_{r=1}^2 X_{mr} - \sum_{r=1}^2 X_{nr} = v_{mn}^+ + v_{mn}^- \quad (6.6)$$

$$m = 1, \dots, N^{md} - 1, \quad n = m + 1, \dots, N^{md}$$

- Eqs. (6.7, 6.8 e 6.9) - relacionam as variáveis de decisão binárias Z_{rmn} e Y_{mr} , de tal modo que quando os módulos m e n são ambos alocados na mesma fileira r (isto é, $Y_{mr} = n = 1$), Z_{rmn} ou Z_{rnm} deve ser igual a 1; caso contrário, $Z_{rmn} = Z_{rnm} = 0$.

$$Z_{rmn} + Z_{rnm} \leq Y_{mr} \quad (6.7)$$

$$m = 1, \dots, N^{md} - 1, \quad n = m + 1, \dots, N^{md}, \quad r = 1, 2$$

$$Z_{rmn} + Z_{rnm} \leq Y_{nr} \quad (6.8)$$

$$m = 1, \dots, N^{md} - 1, \quad n = m + 1, \dots, N^{md}, \quad r = 1, 2$$

$$Z_{rmn} + Z_{rnm} + 1 \geq Y_{mr} + Y_{nr} \quad (6.9)$$

$$m = 1, \dots, N^{md} - 1, \quad n = m + 1, \dots, N^{md}, \quad r = 1, 2$$

- Eqs. (6.10, 6.11 e 6.12) - são empregadas para determinar os limites inferiores no comprimento (dimensão horizontal) e a área do *layout*.

$$C^{total} \geq X_{mr} + \frac{1}{2} A_i Y_{mr} \quad (6.10)$$

$$m = 1, \dots, N^{md}, \quad r = 1, 2$$

$$X_{mr} - \frac{1}{2} A_i Y_{mr} \geq 0 \quad (6.11)$$

$$m = 1, \dots, N^{md}, \quad r = 1, 2$$

$$A_r^{fileira} \geq B_i C^{total} - B_i M(1 - Y_{mr}) \geq 0 \quad (6.12)$$

$$r = 1, 2, \quad m = 1, \dots, N^{md}$$

- Eq. (6.13) - determina a área total do *layout* composta pelas áreas da fileira superior, da fileira inferior e do corredor que separa as duas fileiras.

$$A^{total} = A_1^{fileira} + A_2^{fileira} + C^{total}L \quad (6.13)$$

- Eq. (6.14) - determina se os módulos m e n estão na mesma fileira.

$$q_{mn} = \sum_{r=1}^2 (Z_{rmn} + Z_{rnm}) \quad (6.14)$$

$$m = 1, \dots, N^{md} - 1, \quad n = m + 1, \dots, N^{md}$$

- Eqs. (6.15, 6.16, 6.17, 6.18, 6.19, 6.20, 6.21 e 6.22) - definem as condições de contorno das variáveis de decisão.

$$X_{mr} \geq 0 \quad (6.15)$$

$$m = 1, \dots, N^{md}, \quad r = 1, 2$$

$$v_{ij}^+, v_{ij}^- \geq 0 \quad (6.16)$$

$$m = 1, \dots, N^{md} - 1, \quad n = m + 1, \dots, N^{md}$$

$$Y_{mr} \in \{0,1\} \quad (6.17)$$

$$m = 1, \dots, N^{md}, \quad r = 1, 2$$

$$Z_{rmn} \in \{0,1\} \quad (6.18)$$

$$m, n = 1, \dots, N^{md}, \quad r = 1, 2$$

$$q_{mn} \in \{0,1\} \quad (6.19)$$

$$m = 1, \dots, N^{md} - 1, \quad n = m + 1, \dots, N^{md}$$

$$A_r^{fileira} \geq 0 \quad (6.20)$$

$$r = 1, 2$$

$$A^{total} \geq 0 \quad (6.21)$$

$$C^{total} \geq 0 \quad (6.22)$$

De modo a reduzir o espaço de busca, foram inseridas as seguintes desigualdades válidas, conforme sugerido por Murray et al. (2012):

- Eqs. (6.23 e 6.24) e Eq. (6.25) - estabelecem um limite superior para o comprimento do *layout*.

$$C^{total} \leq X_{m1} + \frac{A_m}{2} + M \left((1 + Y_{m1}) + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^{N^{md}} Z_{1mn} + (1 - l) \right) \quad (6.23)$$

$$m = 1, \dots, N^{md}$$

$$C^{total} \leq X_{m2} + \frac{A_m}{2} + M \left((1 + Y_{m2}) + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^{N^{md}} Z_{2mn} + l \right) \quad (6.24)$$

$$m = 1, \dots, N^{md}$$

$$l \in \{0,1\} \quad (6.25)$$

onde,

$$M = \sum_{m=1}^{N^{md}} (A_m + D) \quad (6.26)$$

A Eq. (6.26) não está incluída na formulação do modelo de PIM. O valor M é calculado em *software* externo e fornecido como dado para o modelo.

6.2 Estudo de Caso

O modelo descrito anteriormente foi aplicado ao posicionamento de módulos do *FPSO* P-75. Os dados utilizados para a realização deste trabalho são reais e foram obtidos de documentos técnicos do Projeto Executivo da P-75, de propriedade da Petrobras. Nas tabelas seguintes, são apresentados os dados utilizados na modelagem do problema.

Tabela 6.1 - Dimensões dos módulos.

m	Módulo	Comprimento A_m [m]	Largura B_m [m]
1	<i>M-01 Flare System</i>	19,50	20,00
2	<i>M-02 CO2 Compression</i>	28,00	23,20
3	<i>M-03 Exportation Gas Compression</i>	23,00	22,00
4	<i>M-04 CO2 Removal</i>	21,00	22,00
5	<i>M-05 Main Gas Compression and VRU System</i>	22,23	22,00
6	<i>M-06 Gas Dehydration, Fuel Gas and HCDP</i>	20,00	22,00
7	<i>M-07 Gas Injection</i>	19,00	22,00
8	<i>M-08 H2S Removal System</i>	29,00	22,00
9	<i>M-09 Pig Launchers/Receivers and Production & Injection Manifolds</i>	27,50	22,00
10	<i>M-10 Oil Processing and Produced Water Treatment</i>	45,00	22,00
11	<i>M-11 Water Injection and Sulphate Removal Unit</i>	26,50	22,00
12	<i>M-12 Power Generation</i>	29,00	22,00
13	<i>M-13 Power Generation</i>	29,00	22,00
14	<i>M-14 Chemical Unit and Products Storage</i>	12,78	22,00
15	<i>M-15 Utilities</i>	17,50	22,15
16	<i>M-16 Laydown Area</i>	20,00	22,00
17	<i>M-17 Automation and Electrical</i>	29,25	25,00
18	<i>Crane (Fwd)</i>	3,60	3,60
19	<i>Laboratory + Crane (Aft)</i>	9,30	15,00
20	<i>Nitrogen Backup</i>	5,00	10,00

Além dos módulos tradicionais da planta de processo (*M-01* a *M-17*), itens que ocupam um *footprint* na planta de processo, como os guindastes, o laboratório e o banco de *backup* de nitrogênio, foram considerados como módulos. O guindaste de ré e o laboratório foram agrupados em um único módulo, pois estes dois são posicionados frente a frente. O resultado foi um conjunto de vinte módulos a serem posicionados, apresentado na Tabela 6.1.

Tabela 6.2 - Soma dos custos das tubulações, em \$/m, que interligam os módulos.

m	n	C^p_{mn} [\$/m]
1	3	24,83
2	4	112,53
2	7	97,18
3	4	85,13
3	7	97,18
3	9	97,18
4	6	64,71
5	6	84,14
5	8	280,44
5	10	176,89
5	11	70,55
6	9	41,70
7	9	171,26
7	10	10,46
9	10	64,84
11	15	10,46

Os valores apresentados na Tabela 6.2, acima, representam a soma dos custos das tubulações individuais que interligam os módulos. Os módulos *M-12 Power Generation*, *M-13 Power Generation*, *M-14 Chemical Unit and Products Storage*, *M-16 Laydown Area*, *M-17 Automation and Electrical*, *Crane (Fwd)*, *Laboratory + Crane (Aft)* e *Nitrogen Backup* não são interligados por tubulações a outros módulos do FPSO (ou são interligados por tubulações de custo muito baixo) e, portanto, não foram considerados na otimização.

A distância mínima entre módulos D foi definida em 1,2 m. Este valor foi obtido através da média das distâncias entre módulos, observado no *layout* de módulos adotado na P-75.

Devido às especificidades do problema de posicionamento de módulos, as seguintes restrições adicionais foram inseridas ao modelo:

- O vaso de *knock-out* (separador líquido vapor) deve estar localizado próximo à base do *flare*, deste modo, o *M-01* deve ser o módulo mais a vante: $Z_{r,1,n} = 0$;
- Os módulos *M-09* e *Nitrogen Backup* devem estar em bombordo: $Y_{9,2} = Y_{20,2} = 1$, próximo ao balcão de *risers*;
- Os módulos *M-08*, *M-14*, *M-16* e os guindastes devem estar em boreste: $Y_{8,1} = Y_{14,1} = Y_{16,1} = Y_{18,1} = Y_{19,1} = 1$, para a movimentação de cargas entre o FPSO e os barcos de apoio;

- Requisitos de movimentação de cargas do *FPSO*:
 - os módulos *M-14* e *M-16* devem estar dentro do raio de ação do guindaste de popa: $|X_{19,1} - X_{14,1}| \leq 30$ e $|X_{19,1} - X_{16,1}| \leq 30$; e
 - os módulos *M-08* e *Nitrogen Backup* devem estar dentro do raio de ação do guindaste de proa: $|X_{18,1} - X_{8,1}| \leq 30$ e $|X_{18,1} - X_{20,2}| \leq 10$; e
- De modo a se obter um *layout* de módulos que considera a separação entre áreas de alto risco (grande inventário de hidrocarbonetos) e de baixo risco (pequeno inventário de hidrocarbonetos), as variáveis inteiras $Z_{r,(11,12,13,14,15,16,17),n}$ foram fixadas em 0, ou seja, os módulos mais seguros devem estar localizados a ré.

6.3 Parâmetro α

O parâmetro α pondera os dois objetivos da otimização: o custo de tubulações que interligam os módulos e o custo do tamanho do *layout*. Se $\alpha = 1$, apenas o custo total de tubulações será considerado na função objetivo. Já, se $\alpha = 0$, apenas o custo de ocupação de área será considerado na função objetivo. Deve-se notar, porém, que $\alpha = 0,5$ não implica que a minimização do custo total de tubulações e do custo de ocupação de área seja igualmente ponderada, visto que há diferenças de escala entre essas duas métricas.

A inclusão deste parâmetro no modelo de otimização permite a escolha entre priorizar o custo de tubulação ou priorizar o custo de ocupação de área. Além disso, através da consideração de diferentes valores de α é possível obter diferentes resultados de *layout* para posterior análise e comparação. Neste trabalho, foram considerados valores de α iguais a 1,00, 0,75, 0,50, 0,25 e 0,00.

6.4 Resultados

O problema de otimização do posicionamento de módulos foi então modelado na linguagem FICO® Xpress Mosel 4.8.3 e resolvido através do *branch-and-bound* padrão do *software* FICO® Xpress Optimizer 8.5 64 bits (*branch-and-bound* automático com geração automática de cortes e heurísticas).

Apenas para $\alpha = 1,00$, ou seja, considerando apenas custo total de tubulações na função objetivo, o modelo, com 1429 variáveis e 2517 restrições, foi resolvido de maneira ótima (intervalo entre os limitantes inferiores e superiores igual a zero). Para os

valores de α igual a 0,75, 0,50, 0,25 e 0,00 não foi possível obter a solução ótima do modelo (intervalo entre os limitantes inferiores e superiores diferente a zero). Isso ocorre devido a uma característica da formulação do modelo: quando trocamos dois módulos de posição dentro de uma mesma fileira, o custo total de tubulações pode mudar, mas a área do *layout* e, por consequência, o custo de ocupação de área não são impactados. Assim, quanto mais α se aproxima de zero, mais difícil de serem realizadas podas na árvore de *branch-and-bound*. Os principais resultados da otimização são apresentados na sequência.

As tabelas de 6.3 a 6.7, a seguir, apresentam a posição do centro do módulo m na fileira r , para os diversos valores de α .

Tabela 6.3 - Posição do centro do módulo m na fileira r , $\alpha = 1,00$.

m	Módulo	$X_{m,1}$ [m]	$X_{m,2}$ [m]
1	<i>M-01 Flare System</i>	247,24	0,00
2	<i>M-02 CO2 Compression</i>	0,00	227,29
3	<i>M-03 Exportation Gas Compression</i>	202,59	0,00
4	<i>M-04 CO2 Removal</i>	225,79	0,00
5	<i>M-05 Main Gas Compression and VRU System</i>	140,69	0,00
6	<i>M-06 Gas Dehydration, Fuel Gas and HCDP</i>	178,14	0,00
7	<i>M-07 Gas Injection</i>	0,00	202,59
8	<i>M-08 H2S Removal System</i>	113,88	0,00
9	<i>M-09 Pig Launchers/Receivers and Production & Injection Manifolds</i>	0,00	178,14
10	<i>M-10 Oil Processing and Produced Water Treatment</i>	0,00	140,69
11	<i>M-11 Water Injection and Sulphate Removal Unit</i>	0,00	103,74
12	<i>M-12 Power Generation</i>	0,00	14,50
13	<i>M-13 Power Generation</i>	14,50	0,00
14	<i>M-14 Chemical Unit and Products Storage</i>	47,09	0,00
15	<i>M-15 Utilities</i>	84,63	0,00
16	<i>M-16 Laydown Area</i>	64,68	0,00
17	<i>M-17 Automation and Electrical</i>	0,00	44,83
18	<i>Crane (Fwd)</i>	96,38	0,00
19	<i>Laboratory + Crane (Aft)</i>	34,85	0,00
20	<i>Nitrogen Backup</i>	0,00	86,38

Tabela 6.4 - Posição do centro do módulo m na fileira r , $\alpha = 0,75$.

m	Módulo	$X_{m,1}$ [m]	$X_{m,2}$ [m]
1	<i>M-01 Flare System</i>	239,90	0,00
2	<i>M-02 CO2 Compression</i>	0,00	220,78
3	<i>M-03 Exportation Gas Compression</i>	195,25	0,00
4	<i>M-04 CO2 Removal</i>	218,45	0,00
5	<i>M-05 Main Gas Compression and VRU System</i>	0,00	124,36
6	<i>M-06 Gas Dehidration, Fuel Gas and HCDP</i>	0,00	146,68
7	<i>M-07 Gas Injection</i>	0,00	196,08
8	<i>M-08 H2S Removal System</i>	121,85	0,00
9	<i>M-09 Pig Launchers/Receivers and Production & Injection Manifolds</i>	0,00	171,63
10	<i>M-10 Oil Processing and Produced Water Treatment</i>	160,05	0,00
11	<i>M-11 Water Injection and Sulphate Removal Unit</i>	0,00	98,80
12	<i>M-12 Power Generation</i>	60,18	0,00
13	<i>M-13 Power Generation</i>	0,00	14,50
14	<i>M-14 Chemical Unit and Products Storage</i>	6,39	0,00
15	<i>M-15 Utilities</i>	0,00	38,95
16	<i>M-16 Laydown Area</i>	34,48	0,00
17	<i>M-17 Automation and Electrical</i>	0,00	63,53
18	<i>Crane (Fwd)</i>	91,85	0,00
19	<i>Laboratory + Crane (Aft)</i>	18,63	0,00
20	<i>Nitrogen Backup</i>	0,00	81,85

Tabela 6.5 - Posição do centro do módulo m na fileira r , $\alpha = 0,50$.

m	Módulo	$X_{m,1}$ [m]	$X_{m,2}$ [m]
1	<i>M-01 Flare System</i>	223,85	0,00
2	<i>M-02 CO2 Compression</i>	0,00	210,15
3	<i>M-03 Exportation Gas Compression</i>	0,00	183,45
4	<i>M-04 CO2 Removal</i>	202,40	0,00
5	<i>M-05 Main Gas Compression and VRU System</i>	103,19	0,00
6	<i>M-06 Gas Dehidration, Fuel Gas and HCDP</i>	160,50	0,00
7	<i>M-07 Gas Injection</i>	181,20	0,00
8	<i>M-08 H2S Removal System</i>	130,00	0,00
9	<i>M-09 Pig Launchers/Receivers and Production & Injection Manifolds</i>	0,00	157,00
10	<i>M-10 Oil Processing and Produced Water Treatment</i>	0,00	113,35
11	<i>M-11 Water Injection and Sulphate Removal Unit</i>	77,63	0,00
12	<i>M-12 Power Generation</i>	0,00	75,15
13	<i>M-13 Power Generation</i>	0,00	44,95
14	<i>M-14 Chemical Unit and Products Storage</i>	27,59	0,00
15	<i>M-15 Utilities</i>	54,43	0,00
16	<i>M-16 Laydown Area</i>	10,00	0,00
17	<i>M-17 Automation and Electrical</i>	0,00	14,63
18	<i>Crane (Fwd)</i>	147,50	0,00
19	<i>Laboratory + Crane (Aft)</i>	39,83	0,00
20	<i>Nitrogen Backup</i>	0,00	139,55

Tabela 6.6 - Posição do centro do módulo m na fileira r , $\alpha = 0,25$.

m	Módulo	$X_{m,1}$ [m]	$X_{m,2}$ [m]
1	<i>M-01 Flare System</i>	218,15	0,00
2	<i>M-02 CO2 Compression</i>	0,00	166,95
3	<i>M-03 Exportation Gas Compression</i>	195,70	0,00
4	<i>M-04 CO2 Removal</i>	172,50	0,00
5	<i>M-05 Main Gas Compression and VRU System</i>	114,69	0,00
6	<i>M-06 Gas Dehidration, Fuel Gas and HCDP</i>	0,00	89,35
7	<i>M-07 Gas Injection</i>	0,00	191,65
8	<i>M-08 H2S Removal System</i>	141,50	0,00
9	<i>M-09 Pig Launchers/Receivers and Production & Injection Manifolds</i>	0,00	216,10
10	<i>M-10 Oil Processing and Produced Water Treatment</i>	0,00	123,05
11	<i>M-11 Water Injection and Sulphate Removal Unit</i>	89,13	0,00
12	<i>M-12 Power Generation</i>	0,00	33,20
13	<i>M-13 Power Generation</i>	60,18	0,00
14	<i>M-14 Chemical Unit and Products Storage</i>	16,89	0,00
15	<i>M-15 Utilities</i>	0,00	8,75
16	<i>M-16 Laydown Area</i>	34,48	0,00
17	<i>M-17 Automation and Electrical</i>	0,00	63,53
18	<i>Crane (Fwd)</i>	159,00	0,00
19	<i>Laboratory + Crane (Aft)</i>	4,65	0,00
20	<i>Nitrogen Backup</i>	0,00	149,25

Tabela 6.7 - Posição do centro do módulo m na fileira r , $\alpha = 0,00$.

m	Módulo	$X_{m,1}$ [m]	$X_{m,2}$ [m]
1	<i>M-01 Flare System</i>	0,00	219,23
2	<i>M-02 CO2 Compression</i>	0,00	115,75
3	<i>M-03 Exportation Gas Compression</i>	217,48	0,00
4	<i>M-04 CO2 Removal</i>	0,00	90,05
5	<i>M-05 Main Gas Compression and VRU System</i>	0,00	142,06
6	<i>M-06 Gas Dehidration, Fuel Gas and HCDP</i>	159,78	0,00
7	<i>M-07 Gas Injection</i>	0,00	192,58
8	<i>M-08 H2S Removal System</i>	185,48	0,00
9	<i>M-09 Pig Launchers/Receivers and Production & Injection Manifolds</i>	0,00	168,13
10	<i>M-10 Oil Processing and Produced Water Treatment</i>	126,08	0,00
11	<i>M-11 Water Injection and Sulphate Removal Unit</i>	89,13	0,00
12	<i>M-12 Power Generation</i>	60,18	0,00
13	<i>M-13 Power Generation</i>	0,00	14,50
14	<i>M-14 Chemical Unit and Products Storage</i>	6,39	0,00
15	<i>M-15 Utilities</i>	0,00	39,15
16	<i>M-16 Laydown Area</i>	34,48	0,00
17	<i>M-17 Automation and Electrical</i>	0,00	63,73
18	<i>Crane (Fwd)</i>	202,98	0,00
19	<i>Laboratory + Crane (Aft)</i>	18,63	0,00
20	<i>Nitrogen Backup</i>	0,00	205,78

A Tabela de 6.8, a seguir, apresenta um resumo dos resultados da otimização do posicionamento de módulos, para os diversos valores de α .

Tabela 6.8 - Resultados da otimização do posicionamento de módulos.

Descrição	$\alpha = 1,00$	$\alpha = 0,75$	$\alpha = 0,50$	$\alpha = 0,25$	$\alpha = 0,00$
Área do <i>layout</i> [m²]	13839	13406	12579	12343	12296
Comprimento do <i>layout</i> [m]	257	250	234	230	229
Custo de ocupação de área [\$]	691940	670310	628968	617147	614798
Custo total de tubulações [\$]	386023	392342	443813	511830	742816
Custo total do <i>layout</i> [\$]	1077963	1062652	1072781	1128977	1357614
Intervalo entre os entre limitantes inferiores e superiores	0,00%	23,89%	37,04%	45,67%	45,66%
Tempo de CPU [s]*	27	600**	600**	600**	600**

*Computador com Windows 10, processador Intel® Core™ i5-5200U CPU @ 2.20 GHz e memória RAM de 6,00 GB.

**O tempo máximo de execução do modelo foi definido em 600s.

A partir dos resultados obtidos, utilizou-se o *software* Bentley MicroStation V8i para a elaboração dos desenhos de *layout* apresentados a seguir.

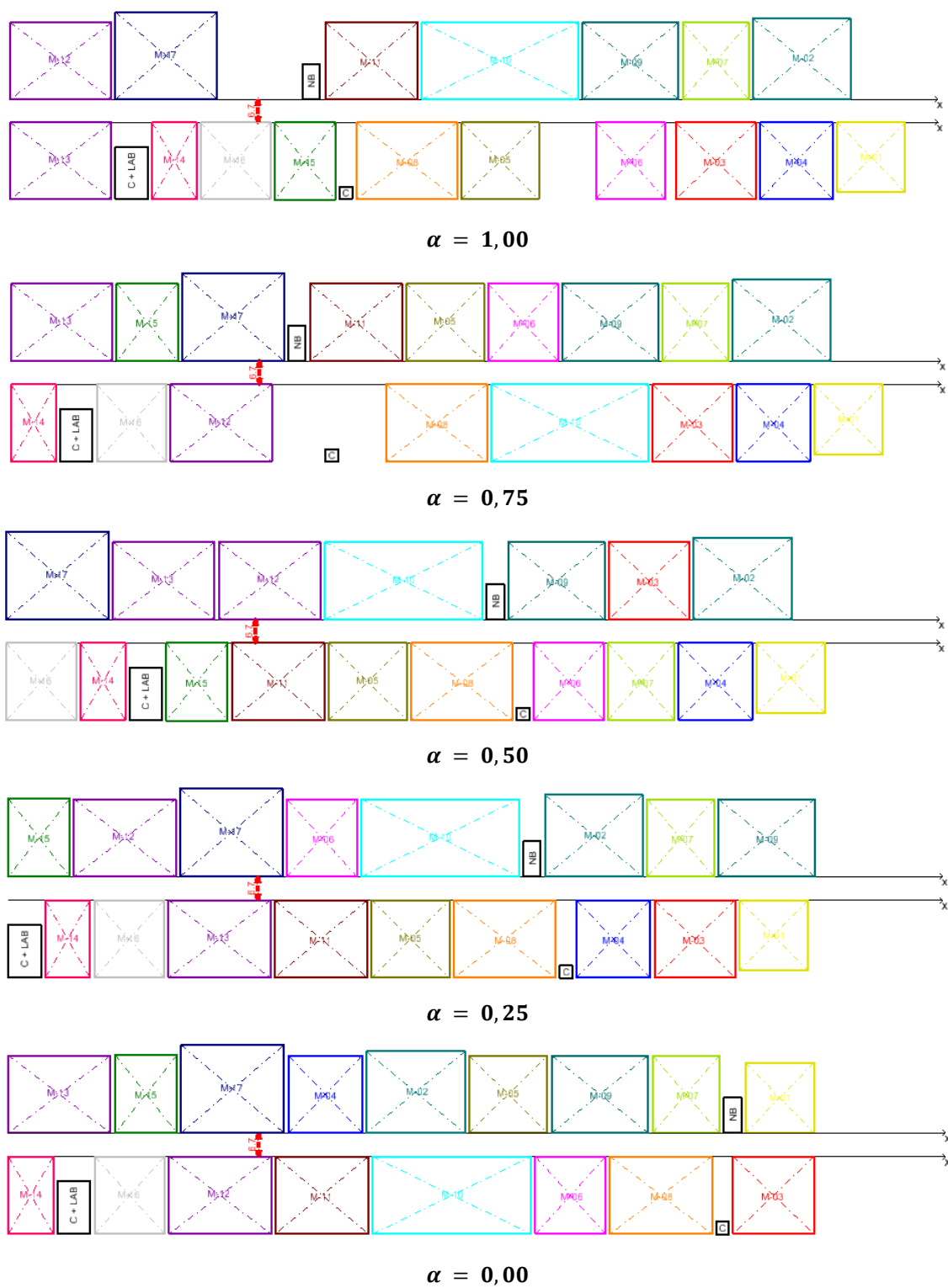


Figura 6.1 – Resultados da otimização do posicionamento de módulos.

6.5 Discussão

Os *layouts* de módulos obtidos neste trabalho foram comparados ao *layout* de módulos adotado na P-75, com área igual a 12.682 m² (231,0 x 54,9 m). O custo total do *layout* (utilizando os mesmos parâmetros considerados na otimização) é de \$ 1.321.617,24, sendo \$ 634.100,00 para custo de ocupação de área e \$ 687.517,24 para o custo total de tubulações. Na Tabela 6.9, os resultados dos *layouts* obtidos pelo modelo de otimização são comparados com os dados do *layout* de módulos adotado na P-75.

Tabela 6.9 – Comparação dos *layouts* obtidos pelo modelo de otimização com o *layout* de módulos adotado na P-75.

Descrição	Real	Média	%	Melhor	%	Pior	%
Área do <i>layout</i> [m ²]	12682	12893	1,66%	12296	-3,04%	13839	9,12%
Comprimento do <i>layout</i> [m]	231	240	3,90%	229	-0,87%	257	11,26%
Custo de ocupação de área [\$]	634100	644633	1,66%	614798	-3,04%	691940	9,12%
Custo total de tubulações [\$]	687517	495365	-27,95%	386023	-43,85%	742816	8,04%
Custo do <i>layout</i> [\$]	1321617	1139997	-13,74%	1062652	-19,59%	1357614	2,72%

Os *layouts* de módulos obtidos pelo modelo de otimização proposto neste trabalho têm um custo, em média, 13,7% menor em relação ao *layout* de módulos adotado na P-75. As áreas do *layout* de módulos obtidas pelo modelo de otimização ficaram bastante próximas da área do *layout* de módulos adotado neste FPSO. Já o custo total de tubulações foi significativamente menor, exceto para $\alpha = 0,00$ já que, neste caso, somente a minimização do custo de ocupação de área foi considerado na função objetivo. Isso se deve, pois, o modelo de otimização alocou os módulos de modo a reduzir o comprimento de tubulações que os interligam, resultando num custo de tubulações, em média, 27,9% menor.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma abordagem computacional para o problema de otimização do arranjo físico da planta de processo de um *FPSO*. Essa abordagem foi dividida em três etapas: a etapa 1 (dividir a planta em módulos) foi considerada dada; a etapa 2 (otimizar o arranjo físico dos equipamentos dentro de cada módulo) foi abordada no Capítulo 5, que apresentou um modelo de PIM, para o posicionamento de equipamentos em um *layout* em múltiplos pisos; e a etapa 3 (otimizar o arranjo físico dos módulos) foi abordada no Capítulo 6, que apresentou um modelo de PIM, para o posicionamento de módulos em fileiras paralelas separadas por um corredor de largura fixa (*Double Row Layout Problems*).

Os modelos propostos neste trabalho foram implementados no *software* FICO[®] Xpress Optimizer, utilizando dados reais de *FPSOs*, como um estudo de caso. O modelo de otimização do posicionamento de equipamentos, apresentado no Capítulo 5, foi resolvido de maneira ótima, e o *layout* de equipamentos obtido teve um custo 26,7% menor em relação ao *layout* de equipamentos adotado no módulo de *FPSO*. Já, no caso do modelo de otimização do posicionamento de módulos, apresentado no Capítulo 6 somente foi possível obter a solução ótima do para $\alpha = 1,00$, para α igual a 0,75, 0,50, 0,25 e 0,00 não foi possível obter a solução ótima. Os *layouts* de módulos obtidos tiveram um custo, em média, 13,7% menor em relação ao *layout* de módulos adotado no *FPSO*.

A abordagem apresentada neste trabalho permitiu que fossem obtidos *layouts* que dificilmente seriam considerados caso fossem elaborados por projetista humano. Pois, além de atender todas as restrições relativas à operação, manutenção e segurança, é difícil para o projetista humano considerar os diversos objetivos da otimização, principalmente a minimização do custo de tubulações. Isso pôde ser verificado através dos exemplos apresentados, cujos *layouts* obtidos tiveram custos de tubulações significativamente menores que os *layouts* adotados nos *FPSOs*. No caso, o *layout* obtido pelo modelo de otimização do posicionamento de equipamentos, teve custo de tubulações 27,4% menor e o *layout* obtido pelo modelo de otimização do posicionamento de módulos, teve custo de tubulações, em média, 27,9% menor.

Embora não possa ser garantida a obtenção do arranjo físico ótimo da planta de processo de um *FPSO*, a abordagem apresentada neste trabalho se mostrou adequada

para a concepção de arranjos preliminares, ou seja, durante as fases iniciais do projeto. Nesta etapa, o modelo deve ser apropriado para aplicações repetitivas, com variação nos dados de entrada, e ter como característica a obtenção de soluções boas ou razoáveis (melhores do que soluções manuais), obtidas com regularidade e com pouca variação no desempenho das soluções. Cabe ainda ressaltar que o intuito dessa abordagem não é prover *layouts* definitivos, mas sim introduzir uma ferramenta de projeto útil e prática que irá auxiliar o projetista humano durante a elaboração de arranjos da planta de processo de *FPSOs*.

7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

A etapa 1 (dividir a planta em módulos), considerada dada neste trabalho, é normalmente feita por inspeção. O projetista humano divide a planta de processo do *FPSO* em módulos de modo a agrupar equipamentos de um mesmo sistema ou de um mesmo grupo de sistemas em um mesmo módulo. Sugere-se que esta etapa seja feita usando um método de particionamento. O objetivo seria agrupar os equipamentos que mais se relacionam, ou seja, que são interligados por tubulações, estando sujeito a restrições de construtibilidade (peso máximo do módulo, por exemplo) e segurança (segregação de áreas perigosas, por exemplo).

Os parâmetros da otimização custo do tamanho do *layout* e custo de suportes de cada equipamento (para equipamento elevado) foram baseados em valores obtidos na literatura. Porém, esses valores estão sujeitos a mudanças ao longo do tempo e podem variar de projeto para projeto. O custo do tamanho do *layout* de um projeto de *FPSO* é diferente de um projeto de refinaria, por exemplo, visto que no segundo caso a disponibilidade de área é muito maior. Sendo assim, sugere-se que seja feita uma atualização desses parâmetros.

Conforme apresentado no item 6.4, não foi possível obter a solução ótima do modelo de otimização do posicionamento de módulos para alguns valores de α . Isso ocorre devido à presença de soluções de custo muito próximos, dificultando a realização de podas na árvore de *branch-and-bound*. Deste modo, sugere-se acrescentar desigualdades válidas que fortaleçam os modelos matemáticos visando, principalmente, retirar este aspecto do problema.

Os modelos de otimização, apresentados neste trabalho, ainda não foram usados em projetos reais da Petrobras. Deste modo, sugere-se realizar o encaminhamento preliminar de tubulações visando verificar a viabilidade dos *layouts*

obtidos. E, com o resultado do encaminhamento de tubulações, sugere-se aprimorar os modelos adicionando restrições, conforme necessidade.

Além destas, considerar as seguintes sugestões gerais para trabalhos futuros:

- Adaptar os modelos de otimização para aplicação em outros tipos de UEP; e
- Utilizar outros métodos de resolução para a otimização do arranjo físico da planta de processo de UEPs.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMADI, Abbas; PISHVAEE, Mir Saman; JOKAR, Mohammad Reza Akbari. A survey on multi-floor facility layout problems. **Computers & Industrial Engineering**, v. 107, p. 158-170, mai. 2017.

ALMEIDA, Sheila S. de. **Otimização de Layout de Plantas Químicas Utilizando o Problema de Designação Quadrática**. 2008. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

AMARAL, Andre R. S. Optimal solutions for the double row layout problem. **Optimization Letters**, v. 7, n. 2, p. 407-413, fev. 2013.

ARENALES, Marcos et al. **Pesquisa Operacional: Para Cursos de Engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

BAHIENSE, Laura. **Programação Inteira**. Rio de Janeiro: Curso do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 12 de jun. a 6 de set. de 2017. Notas de Aula.

CAPUTO, Antonio C. et al. Safety-based process plant layout using genetic algorithm. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 34, p. 139-150, mar. 2015.

CASTELL, C. M. L. et al. Optimisation of process plant layout using genetic algorithms. **Computers & Chemical Engineering**, v. 22, p. S993-S996, mar. 1998.

DRIRA, Amine; PIERREVAL, Henri; HAJRI-GABOUJ, Sonia. Facility layout problems: A survey. **Annual Reviews in Control**, v. 31, n. 2, p. 255-267, 2007.

DRUMMOND, Daniela Medeiros Devienne. **Otimização para o posicionamento dos equipamentos do circuito de massa na fabricação de papel Tissue**. 2004. 180 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

EMAMI, Saeed; NOOKABADI, Ali S. Managing a new multi-objective model for the dynamic facility layout problem. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 68, n. 9-12, p. 2215-2228, fev. 2013.

FRANCEIRA, Sérgio N.; ALMEIDA, Sheila S. de; GUIRARDELLO, Reginaldo. Optimization of Process Plant Layout Using a Quadratic Assignment Problem Model. In: **Conference on Chemical & Process Engineering**, 8., 2007, Ischia, Italia. Florence: The Italian Association of Chemical Engineering, 2007.

FRANCO, Karina P. M. et al. Desenvolvimento de um sistema inteligente para auxiliar a escolha de sistema para produção no mar. In: **Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás**, 2., 2003, Rio de Janeiro. Natal: Associação Brasileira de Petróleo e Gás, 2003.

GEORGIADIS, Michael C. et al. A general mathematical programming approach for process plant layout. **Computers & Chemical Engineering**, v. 23, n. 7, p. 823-840, jul. 1999.

GUIRARDELLO, Reginaldo; SWANEY, Ross E. Optimization of process plant layout with pipe routing. **Computers & Chemical Engineering**, v. 30, n. 1, p. 99-114, nov. 2005.

HAN, Kyusang; CHO, Seonghyun; YOON, En Sup. Optimal layout of a chemical process plant to minimize the risk to humans. **Procedia Computer Science**, v. 22, p. 1146-1155, 2013.

HOSSEINI-NASAB, Hasan et al. Classification of facility layout problems: a review study. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 94, n. 1-4, p. 957-977, jan. 2018.

KIM, Sung-Kyoon; ROH, Myung-II; KIM, Ki-Su. Arrangement method of offshore topside based on an expert system and optimization technique. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v. 139, n. 2, p. 021302, fev. 2017.

KOOPMANS, Tjalling C.; BECKMANN, Martin. Assignment problems and the location of economic activities. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**, p. 53-76, jan. 1957.

LATIFI, Seyyed Ebrahim; MOHAMMADI, Emran; KHAKZAD, Nima. Process plant layout optimization with uncertainty and considering risk. **Computers & Chemical Engineering**, v. 106, p. 224-242, nov. 2017.

LEE, Young Hae; LEE, Moon Hwan. A shape-based block layout approach to facility layout problems using hybrid genetic algorithm. **Computers & Industrial Engineering**, v. 42, n. 2-4, p. 237-248, abr. 2002.

LIU, Qi. **A sequence-pair and mixed integer programming based methodology for the facility layout problem**. 2004. 253 f. Tese (Doctor of Philosophy in Industrial & Systems Engineering) - Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2004.

MELLER, Russell D.; NARAYANAN, Venkat; VANCE, Pamela H. Optimal facility layout design. **Operations Research Letters**, v. 23, n. 3-5, p. 117-127, out. 1998.

MURRAY, Chase C.; ZUO, Xingquan; SMITH, Alice E. **An extended double row layout problem**. In: IMHRC Proceedings, 12., 2012, Gardanne, França. Gardanne: Progress in Material Handling Research, 2012.

PAPAGEORGIOU, Lazaros G.; ROTSTEIN, Guillermo E. Continuous-domain mathematical models for optimal process plant layout. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 37, n. 9, p. 3631-3639, ago. 1998.

PARK, Kyungtae et al. Optimal multi-floor plant layout with consideration of safety distance based on mathematical programming and modified consequence analysis. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 28, n. 4, p. 1009-1018, abr. 2011.

PATSIATZIS, Dimitrios I.; PAPAGEORGIOU, Lazaros G. Optimal multi-floor process plant layout. **Computers & Chemical Engineering**, v. 26, n. 4-5, p. 575-583, mai. 2002.

PETROBRAS. **Sistemática corporativa de projetos de investimento do sistema Petrobras**. Rev. 6. Rio de Janeiro: Gerência de Análise Integrada de Projetos, 2015.

PILLAI, V. Madhusudanan; HUNAGUND, Irappa Basappa; KRISHNAN, Krishna K. Design of robust layout for dynamic plant layout problems. **Computers & Industrial Engineering**, v. 61, n. 3, p. 813-823, out. 2011.

QUELHAS, André D. et al. **Processamento de petróleo e gás**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

RIPON, Kazi Shah Nawaz et al. Adaptive variable neighborhood search for solving multi-objective facility layout problems with unequal area facilities. **Swarm and Evolutionary Computation**, v. 8, p. 1-12, fev. 2013.

TAKAYASSU, Rafael Chinem. **Determinação de arranjo físico de uma refinaria usando algoritmos genéticos para o caso com facilidades de tamanhos desiguais**. 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

TELLES, Pedro C. Silva. **Tubulações industriais: Materiais, Projeto, Montagem**. 10 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

VITAYASAK, Srisatja; PONGCHAROEN, Pupong; HICKS, Chris. A tool for solving stochastic dynamic facility layout problems with stochastic demand using either a

Genetic Algorithm or modified Backtracking Search Algorithm. **International Journal of Production Economics**, v. 190, p. 146-157, ago. 2017.

XU, Gang; PAPAGEORGIOU, Lazaros G. Process plant layout using an improvement-type algorithm. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 87, n. 6, p. 780-788, jun. 2009.

ZUO, Xingquan; MURRAY, Chase C.; SMITH, Alice E. Solving an extended double row layout problem using multiobjective tabu search and linear programming. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 11, n. 4, p. 1122-1132, mar. 2014.

Websites

ESI. Vertifloat™ compact flotation unit. Disponível em: <http://www.energyspecialties.com/secondary_treatment/compact_flotation>. Acesso em: 18 de outubro de 2017.

ESTECO. Opmization Algorithms. Disponível em: <<http://www.esteco.com/modelfrontier/optimization-algorithms>>. Acesso em: 05/12/2017.

FRAMES. Electrostatic Coalescers. Disponível em: <<http://www.frames-group.com/Products/Electrostatic-Coalescers>>. Acesso em: 18 de outubro de 2017.

IBAMA. Ibama autoriza operação da plataforma P-66 na Bacia de Santos. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/noticias/422-2017/1091-ibama-emite-licenca-que-autoriza-operacao-do-navio-plataforma-p-66-na-bacia-de-santos>>. Acesso em: 18 de outubro de 2017.

ILSUNG. CO2 Removal Module for Petrobras has been shipped out. Disponível em: <<http://www.ilsung.com/archives/26002?ckattempt=1>>. Acesso em: 18 de outubro de 2017.

IET. Oil and gas separators. Disponível em: <http://www.iet-engineering.com/activities_oil_and_gas_separators_IET_engineering.asp>. Acesso em: 18 de outubro de 2017.

PETROBRAS. Fatos e Dados: Iniciamos produção da P-66 no Campo de Lula, no pré-sal da Bacia de Santos. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/iniciamos-producao-da-p-66-no-campo-de-lula-no-pre-sal-da-bacia-de-santos.htm>>. Acesso em: 18 de outubro de 2017.

PETROBRAS. Tipos de plataforma. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/infograficos/tipos-de-plataformas/desktop/index.html>>. Acesso em: 18 de outubro de 2017.

9 ANEXOS

9.1 Modelo de Otimização do Posicionamento de Equipamentos

```

model Otimizacao_do_Layout_de_Equipamentos

uses "mmxprs";           !acesso ao solver do Xpress-Optimizer
uses "mmsystem"          !acesso a funções de sistema, como
gettime                  !Leitura de planilha Excel
uses "mmsheet"

declarations

    !Ranges e constantes
    Big_M = 51.0          !a large number
    C_area = 50.0         !cost per unit of area
    N_cp = 1..10          !number of equipment
    N_cp_i = 9            !auxiliar number
    N_cp_f = 10           !auxiliar number
    N_pi = 1..23          !number of piping
    N_nz = 1..60          !number of nozzles
    H = 6                 !height of the floor
    Y = 20                !module's width
    D_h = 1.5             !minimum horizontal distance between
equipment i and j
    D_v = 1               !minimum vertical distance between
equipment i and j

    !Vetores de entrada
    C_p: array(N_pi) of real      !cost per unit of lenght for pipe k
    C_sa: array(N_cp,1..4) of real !unit cost factor for the support
equipment i
    C_sb: array(N_cp,1..4) of real !unit cost factor for the support
equipment i
    a: array(N_cp) of real        !dimension for equipment i
    b: array(N_cp) of real        !dimension for equipment i
    c: array(N_cp) of real        !dimension for equipment i
    E_e: array(N_cp) of real      !minimum vertical elevation of
equipment i
    M: array(N_cp,N_cp) of real   !Mij = 1/2*[max{Ai,Bi} + max{Aj,Bj}]
    F_x: array(N_nz) of real      !relative position of the nozzle p
    F_y: array(N_nz) of real      !relative position of the nozzle p
    F_z: array(N_nz) of real      !relative position of the nozzle p
    i_p: array(N_nz) of integer   !equipment i were nozzle p is located
    k_o: array(N_pi) of integer   !node origin for pipe k, terminal
nozzle of pipe k
    k_d: array(N_pi) of integer   !node destination for pipe k, terminal
nozzle of pipe k

    !Variáveis de decisão
    X: mpvar                    !size of the box that enclosures the
plant layout
    !Y: mpvar                    !size of the box that enclosures the
plant layout
    Z: mpvar                    !size of the box that enclosures the
plant layout
    C_s: array(N_cp) of mpvar   !cost of supports for equipment i
    x: array(N_cp) of mpvar     !position of the center of equipment i
    y: array(N_cp) of mpvar     !position of the center of equipment i
    z: array(N_cp) of mpvar     !position of the center of equipment i
    x_n: array(N_nz) of mpvar   !position of nozzle p
    y_n: array(N_nz) of mpvar   !position of nozzle p
    z_n: array(N_nz) of mpvar   !position of nozzle p
    l_xpos: array(N_pi) of mpvar !lenght of pipe k using Manhattan
distance

```

```

    l_xneg: array(N_pi) of mpvar           !lenght of pipe k using Manhattan
distance
    l_ypos: array(N_pi) of mpvar           !lenght of pipe k using Manhattan
distance
    l_yneg: array(N_pi) of mpvar          !lenght of pipe k using Manhattan
distance
    l_zpos: array(N_pi) of mpvar           !lenght of pipe k using Manhattan
distance
    l_zneg: array(N_pi) of mpvar           !lenght of pipe k using Manhattan
distance
    w: array(N_cp,1..8) of mpvar           !integer variable for rotation of
equipment i
    w_x: array(N_cp,N_cp) of mpvar         !integer variables for the relative
position between equipment i and j
    w_y: array(N_cp,N_cp) of mpvar         !integer variables for the relative
position between equipment i and j
    w_z: array(N_cp,N_cp) of mpvar         !integer variables for the relative
position between equipment i and j
    d_x: array(N_cp,N_cp) of mpvar         !Manhattan distance between the
centers of equipment i and j
    d_y: array(N_cp,N_cp) of mpvar         !Manhattan distance between the
centers of equipment i and j
    d_z: array(N_cp,N_cp) of mpvar         !Manhattan distance between the
centers of equipment i and j

end-declarations

!Dados de entrada (leitura do Excel)
initializations from "mmsheet.excel:Dados.xlsx"

C_p as "noindex;[Dados$AH4:AH26]"
C_sa as "noindex;[CalculosC_sa_C_sb$J3:M12]"
C_sb as "noindex;[CalculosC_sa_C_sb$J15:M24]"
a as "noindex;[Dados$N4:N13]"
b as "noindex;[Dados$O4:O13]"
c as "noindex;[Dados$P4:P13]"
E_e as "noindex;[Dados$Q4:Q13]"
!D_h as "noindex;[CalculosD_h_D_v$C4:H9]"
!D_v as "noindex;[CalculosD_h_D_v$C15:H20]"
M as "noindex;[CalculosM$G3:P12]"
F_x as "noindex;[Dados$Z4:Z63]"
F_y as "noindex;[Dados$AA4:AA63]"
F_z as "noindex;[Dados$AB4:AB63]"
i_p as "noindex;[Dados$U4:U63]"
k_o as "noindex;[Dados$AF4:AF26]"
k_d as "noindex;[Dados$AG4:AG26]"

end-initializations

!Função objetivo
Custo_area := C_area*X*Y
Custo_sup := sum(i in N_cp) C_s(i)
Custo_pip := sum(k in N_pi)
C_p(k)*(l_xpos(k)+l_xneg(k)+l_ypos(k)+l_yneg(k)+l_zpos(k)+l_zneg(k))
MinVal := Custo_area + Custo_sup + Custo_pip

!Restrições
forall(i in N_cp, s in 1..4) C_s(i) >= C_sa(i,s)*(z(i)*H + E_e(i)) + C_sb(i,s)
!cost of support for each equipment

forall(i in N_cp) X >= x(i) + a(i)/2*(w(i,1) + w(i,3) + w(i,5) + w(i,7)) +
b(i)/2*(w(i,2) + w(i,4) + w(i,6) + w(i,8)) !main dimensions of the plant
forall(i in N_cp) Y >= y(i) + b(i)/2*(w(i,1) + w(i,3) + w(i,5) + w(i,7)) +
a(i)/2*(w(i,2) + w(i,4) + w(i,6) + w(i,8)) !main dimensions of the plant
forall(i in N_cp) Z >= z(i)*H + c(i) + E_e(i) !main dimensions of the plant

```



```

forall(i in N_cp) x(i) >= a(i)/2*(w(i,1) + w(i,3) + w(i,5) + w(i,7)) +
b(i)/2*(w(i,2) + w(i,4) + w(i,6) + w(i,8)) !lower bounds for the center
position of each equipment
forall(i in N_cp) y(i) >= b(i)/2*(w(i,1) + w(i,3) + w(i,5) + w(i,7)) +
a(i)/2*(w(i,2) + w(i,4) + w(i,6) + w(i,8)) !lower bounds for the center
position of each equipment
forall(i in N_cp) z(i) >= 0 !lower bounds for the center position of each
equipment

forall(i in N_cp, j in N_cp | i<>j) d_x(i,j) >= a(i)/2*(w(i,1) + w(i,3) +
w(i,5) + w(i,7)) + b(i)/2*(w(i,2) + w(i,4) + w(i,6) + w(i,8)) + a(j)/2*(w(j,1)
+ w(j,3) + w(j,5) + w(j,7)) + b(j)/2*(w(j,2) + w(j,4) + w(j,6) + w(j,8)) +
(D_h + M(i,j))*w_x(i,j) - M(i,j) !minimum distance between pairs of
equipment
forall(i in N_cp, j in N_cp | i<>j) d_y(i,j) >= b(i)/2*(w(i,1) + w(i,3) +
w(i,5) + w(i,7)) + a(i)/2*(w(i,2) + w(i,4) + w(i,6) + w(i,8)) + b(j)/2*(w(j,1)
+ w(j,3) + w(j,5) + w(j,7)) + a(j)/2*(w(j,2) + w(j,4) + w(j,6) + w(j,8)) +
(D_h + M(i,j))*w_y(i,j) - M(i,j) !minimum distance between pairs of
equipment
forall(i in N_cp, j in N_cp | i<>j) d_z(i,j) >= (D_v + c(i)/2 +
c(j)/2)*w_z(i,j) !minimum distance between pairs of equipment

forall(i in N_cp, j in N_cp | i<>j) d_x(i,j) <= Big_M*(1 - w_x(j,i))
!auxiliary restrictions for the minimum distances
forall(i in N_cp, j in N_cp | i<>j) d_y(i,j) <= Big_M*(1 - w_y(j,i))
!auxiliary restrictions for the minimum distances
forall(i in N_cp, j in N_cp | i<>j) d_z(i,j) <= Big_M*(1 - w_z(j,i))
!auxiliary restrictions for the minimum distances

forall(i in 1..N_cp_i) do
    aux := i+1
    forall(j in aux..N_cp_f) x(i) - x(j) - d_x(i,j) + d_x(j,i) = 0 !connect
the center positions of equipment to the pairwise distances
    forall(j in aux..N_cp_f) y(i) - y(j) - d_y(i,j) + d_y(j,i) = 0 !connect
the center positions of equipment to the pairwise distances
    forall(j in aux..N_cp_f) E_e(i) + z(i)*H + c(i)/2 - E_e(j) - z(j)*H -
c(j)/2 - d_z(i,j) + d_z(j,i) = 0 !connect the center positions of equipment
to the pairwise distances
end-do

forall(p in N_nz) do
    aux := i_p(p)
    x_n(p) = x(aux) + F_x(p)*a(aux)/2*(w(aux,1) + w(aux,3) - w(aux,5) +
w(aux,7)) - F_y(p)*b(aux)/2*(-w(aux,2) + w(aux,4) - w(aux,6) + w(aux,8))
!nozzle positions
    y_n(p) = y(aux) + F_y(p)*b(aux)/2*(w(aux,1) - w(aux,3) - w(aux,5) +
w(aux,7)) + F_x(p)*a(aux)/2*(w(aux,2) - w(aux,4) - w(aux,6) + w(aux,8))
!nozzle positions
    z_n(p) = E_e(aux) + z(aux)*H + c(aux)/2 + F_z(p)*c(aux)/2 !nozzle
positions
end-do

forall(k in N_pi) do
    aux1 := k_o(k)
    aux2 := k_d(k)
    x_n(aux1) - x_n(aux2) - l_xpos(k) + l_xneg(k) = 0 !relate the nozzle
positions to the distances used to estimate the piping cost
    y_n(aux1) - y_n(aux2) - l_ypos(k) + l_yneg(k) = 0 !relate the nozzle
positions to the distances used to estimate the piping cost
    z_n(aux1) - z_n(aux2) - l_zpos(k) + l_zneg(k) = 0 !relate the nozzle
positions to the distances used to estimate the piping cost
end-do

forall(i in N_cp) sum(l in 1..8) w(i,l) = 1 !only one rotation integer
variable is 1 for each equipment

forall(i in 1..N_cp_i) do
    aux := i+1

```

```

        forall(j in aux..N_cp_f) w_x(i,j) + w_x(j,i) + w_y(i,j) + w_y(j,i) +
w_z(i,j) + w_z(j,i) = 1 !only one integer variable for each pair is 1
to restrict minimum distances
end-do

!Variáveis de decisão
X is_continuous
!Y is_continuous
Z is_continuous
forall(i in N_cp) C_s(i) is_continuous
forall(i in N_cp) x(i) is_continuous
forall(i in N_cp) y(i) is_continuous
forall(i in N_cp) z(i) is_integer
forall(p in N_nz) x_n(p) is_continuous
forall(p in N_nz) y_n(p) is_continuous
forall(p in N_nz) z_n(p) is_continuous
forall(k in N_pi) l_xpos(k) is_continuous
forall(k in N_pi) l_xneg(k) is_continuous
forall(k in N_pi) l_ypos(k) is_continuous
forall(k in N_pi) l_xneg(k) is_continuous
forall(k in N_pi) l_zpos(k) is_continuous
forall(k in N_pi) l_xneg(k) is_continuous
forall(i in N_cp, j in N_cp | i<>j) d_x(i,j) is_continuous
forall(i in N_cp, j in N_cp | i<>j) d_y(i,j) is_continuous
forall(i in N_cp, j in N_cp | i<>j) d_z(i,j) is_continuous
forall(i in N_cp, l in 1..8) w(i,l) is_binary
forall(i in N_cp, j in N_cp | i<>j) w_x(i,j) is_binary
forall(i in N_cp, j in N_cp | i<>j) w_y(i,j) is_binary
forall(i in N_cp, j in N_cp | i<>j) w_z(i,j) is_binary

!Fixação de variáveis
X <= 35 !comprimento máximo do módulo
w(7,2) = 0 !separador gravitacional deve estar posicionado paralelamente
ao eixo do navio
w(7,4) = 0
w(7,6) = 0
w(7,8) = 0
w(8,2) = 0 !separador de teste deve estar posicionado paralelamente ao
eixo do navio.
w(8,4) = 0
w(8,6) = 0
w(8,8) = 0
w(9,2) = 0 !TO deve estar posicionado paralelamente ao eixo do navio.
w(9,4) = 0
w(9,6) = 0
w(9,8) = 0
z(1) <= z(9) !bomba de recirculação de água deve estar em elevação menor ou
igual ao TO
z(2) <= z(8) !bomba do separador de teste estar em elevação menor ou igual
ao separador de teste

!Impressão de dados
fopen("Impressao de dados.txt",F_OUTPUT)

writeln("Dimensoes e elevacao [m]")
write("a(i) b(i) c(i) E_e(i)\n")
forall(i in N_cp) do
    write(strfmt(a(i),1)," ",strfmt(b(i),1)," ",strfmt(c(i),1),"
",strfmt(E_e(i),3)," \n")
end-do

writeln(" ")
writeln("Posicao dos bocais:")
write("equipmente i No p F_x(p) F_y(p) F_z(p)\n")
forall(p in N_nz) do
    write(strfmt(i_p(p),6)," ",strfmt(p,2)," ",strfmt(F_x(p),2),"
",strfmt(F_y(p),2)," ",strfmt(F_z(p),2)," \n")
end-do

```

```

writeln(" ")
writeln("Dados de tubulacao:")
write("Linha k      No k_o(k)    No k_d(k)    C_p(k) [$/m]\n")
forall(k in N_pi) do
    write(strfmt(k,4), "      ", strfmt(k_o(k),4), "      ", strfmt(k_d(k),4), "
", strfmt(C_p(k),4), "\n")
end-do

writeln(" ")
writeln("Custos de suportes:")
writeln("C_sa [$/m]")
forall(i in N_cp) do
    forall(s in 1..4) do
        write(strfmt(C_sa(i,s),1), "      ")
    end-do
    writeln(" ")
end-do
writeln(" ")
writeln("C_sb [$/m]")
forall(i in N_cp) do
    forall(s in 1..4) do
        write(strfmt(C_sb(i,s),1), " ")
    end-do
    writeln(" ")
end-do

writeln(" ")
writeln("M")
forall(i in N_cp) do
    forall(j in N_cp) do
        write(strfmt(M(i,j),1), "      ")
    end-do
    writeln(" ")
end-do

fclose(F_OUTPUT)

!optimizing parameters
setparam("XPRS_VERBOSE",true)          !faz com que a otimização vá sendo escrita
na tela

!resolver o subproblema
starttime := gettime
minimize(MinVal)

!reportando a saída
writeln("\n----- -- -----")
writeln("Impressao dos resultados da otimizacao do modelo")
writeln("----- -- -----")

!mipstatus: retorna o status da otimização inteira
mipstatus := getparam("XPRS_MIPSTATUS")

!lpstatus: retorna o status da relaxação linear
lpstatus := getparam("XPRS_LPSTATUS")

if (lpstatus = 5) then
    writeln ("\n Problema ilimitado!!!")
elif (mipstatus = 5) then
    writeln ("\n Problema inviavel!!!")
elif (mipstatus = 6) then
    writeln("\nCusto da area = ", Custo_area.sol)
    writeln("\nCusto de suportes = ", Custo_sup.sol)
    writeln("\nCusto de tubulacao = ", Custo_pip.sol)
    writeln("\nCusto Total = ", getobjval)
    writeln("\nTempo de CPU (em segundos) = ", gettime-starttime)
end-if

```

```

!Impressão dos resultados
fopen("Impressao dos resultados.txt",F_OUTPUT)

writeln("Dimensoes da planta [m]")
write("X      Y      Z\n")
write(X.sol,"      ",Y.sol,"      ",Z.sol,"\\n")

writeln(" ")
writeln("Posicao dos equipamentos:")
write("equipamento i x(i)      y(i)      z(i) (bottom)\\n")
forall(i in N_cp) do
    write(i,"      ",x(i).sol,"      ",y(i).sol,"      ",(z(i).sol),"\\n")
end-do

writeln(" ")
writeln("Custo de suporte dos equipamentos:")
write("equipamento i C_s(i)\\n")
forall(i in N_cp) do
    write(i,"      ",C_s(i).sol,"\\n")
end-do

writeln(" ")
writeln("Comprimento das tubulacoes (utilizando a distancia de Manhattan):")
write("Tubulacao k  l_xpos(k)  l_xneg(k)  l_ypos(k)  l_yneg(k)  l_zpos(k)  l_zneg(k)\\n")
forall(k in N_pi) do
    write(k,"      ",l_xpos(k).sol,"      ",l_xneg(k).sol,"
",l_ypos(k).sol,"      ",l_yneg(k).sol,"      ",l_zpos(k).sol,"
",l_zneg(k).sol,"\\n")
end-do

writeln(" ")
writeln("Posicao dos bocais:")
write("Bocal p  x_n(p)  y_n(p)  z_n(p)\\n")
forall(p in N_nz) do
    write(p,"      ",x_n(p).sol,"      ",y_n(p).sol,"      ",z_n(p).sol,"\\n")
end-do

writeln(" ")
writeln("Distancia entre os equipamentos:")
writeln("Distancia em x d_x [m]")
forall(i in N_cp) do
    forall(j in N_cp) do
        write(d_x(i,j).sol,"      ")
    end-do
    writeln(" ")
end-do
writeln(" ")
writeln("Distancia em y d_y [m]")
forall(i in N_cp) do
    forall(j in N_cp) do
        write(d_y(i,j).sol,"      ")
    end-do
    writeln(" ")
end-do
writeln(" ")
writeln("Distancia em z d_z [m]")
forall(i in N_cp) do
    forall(j in N_cp) do
        write(d_z(i,j).sol,"      ")
    end-do
    writeln(" ")
end-do

writeln(" ")
writeln("Variavel inteira para a rotacao dos equipamentos:")
forall(i in N_cp) do

```

```

        forall(j in 1..8) do
            write(w(i,j).sol," ")
        end-do
        writeln(" ")
    end-do

    writeln(" ")
    writeln("Variavel inteira para a posicao relativa entre os equipamentos:")
    writeln("Posicao relativa w_x(i,j)")
    forall(i in N_cp) do
        forall(j in N_cp) do
            write(w_x(i,j).sol," ")
        end-do
        writeln(" ")
    end-do
    writeln(" ")
    writeln("Posicao relativa w_y(i,j)")
    forall(i in N_cp) do
        forall(j in N_cp) do
            write(w_y(i,j).sol," ")
        end-do
        writeln(" ")
    end-do
    writeln(" ")
    writeln("Posicao relativa w_z(i,j)")
    forall(i in N_cp) do
        forall(j in N_cp) do
            write(w_z(i,j).sol," ")
        end-do
        writeln(" ")
    end-do

    fclose(F_OUTPUT)

    exit(1)

end-model

```

9.2 Modelo de Otimização do Posicionamento de Módulos

```

model Otimizacao_do_Layout_de_Modulos

uses "mmxprs";           !acesso ao solver do Xpress-Optimizer
uses "mmsystem"          !acesso a funções de sistema, como
gettime                  !leitura de planilha Excel
uses "mmsheet"

declarations

    !Ranges e constantes
    N_md = 1..20          !number of modules
    N_md_i = 19            !auxiliar number
    N_md_f = 20            !auxiliar number
    L = 6.7                !width of the Pipe Rack separating the
upper and lower rows
    R = 1..2               !set of rows, where R = {1,2}
specifies the upper (1) and the lower (2) rows
    D = 1.2                !minimum clearance required between
modules
    C_area = 50.0          !cost per unit of area
    alfa = 0.99

    !Vetores de entrada
    A: array(N_md) of real !width of module i
    B: array(N_md) of real !depth of module i
    !D: array(N_md,N_md) of real !minimum clearance required between
module m and n
    C_p: array(N_md,N_md) of real !cost per unit of lenght for pipe
between modules m and n
    M: real                !a large number

    !Variáveis de decisão
    X: array(N_md,R) of mpvar !continuous decision variable
representing the location of module m in row r, such that X(m,r) = 0 if i is
not placed in row r
    Y: array(N_md,R) of mpvar !binary decision variable, such that
Y(m,r) = 1 if module m is placed in row r
    Z: array(R,N_md,N_md) of mpvar !binary decision variable, such that
Z(r,m,n) = 1 if module m is placed to the left of module n in row r
    C_total: mpvar          !total width of the resulting layout
    A_fileira: array(R) of mpvar !area consumed by the modules in row r
    A_total: mpvar          !total area consumed by the resulting
layout
    q: array(N_md,N_md) of mpvar !binary decision variable, such that
q(m,n) = 1 if module m and n are placed in the same row
    v_pos: array(N_md,N_md) of mpvar !absolute value of the horizontal
distance between modules
    v_neg: array(N_md,N_md) of mpvar !absolute value of the horizontal
distance between modules
    l: mpvar                !binary decision variable, which
assumes a value of one (zero) if the upper (lower) row is the longest

    bin: array(1..8) of mpvar !variável auxiliar para "Fixação de
variáveis"
    dis1: array(1..3) of mpvar !variável auxiliar para "Fixação de
variáveis"
    dis2: mpvar             !variável auxiliar para "Fixação de
variáveis"

end-declarations

!Dados de entrada (leitura do Excel)
initializations from "mmsheet.excel:Dados.xlsx"

    A as "noindex;[Module's length$D4:D23]"
    B as "noindex;[Module's length$E4:E23]"

```

```

C_p as "noindex;[Amount of flow between modules$C4:V23]"
!D as "noindex;[Dados$O4:X13]"
M as "noindex;[Module's length$D25]"

end-initializations

!Função objetivo
!Minimizes the weighted total cost of material handling plus the weighted area
of the resulting layout
Flow_cost := sum(m in N_md, n in N_md) C_p(m,n)*(v_pos(m,n)+v_neg(m,n)+L*(1-
q(m,n)))
MinVal := alfa*Flow_cost + (1-alfa)*C_area*A_total

!Restrições
!Ensure that each module is placed in exactly one row
forall(m in N_md, r in R) X(m,r) <= M*Y(m,r)

forall(m in N_md) sum(r in R) Y(m,r) = 1

!Guarantee that the minimum clearance between adjacent modules is satisfied
forall(m in 1..N_md_i) do
    aux := m+1
    forall(n in aux..N_md_f) do
        forall(r in R) do
            (A(m)*Y(m,r)+A(n)*Y(n,r))/2 + D*Z(r,n,m) <= X(m,r) - X(n,r) +
M*(1-Z(r,n,m))
            (A(m)*Y(m,r)+A(n)*Y(n,r))/2 + D*Z(r,m,n) <= -X(m,r) + X(n,r) +
M*(1-Z(r,m,n))
        end-do
    end-do
end-do

!Determines the absolute value of the horizontal distance between modules
forall(m in 1..N_md_i) do
    aux := m+1
    forall(n in aux..N_md_f) do
        sum(r in R) X(m,r) - sum(r in R) X(n,r) = v_neg(m,n) - v_pos(m,n)
    end-do
end-do

!Relate binary decision variables Z(r,i,j) and Y(i,r), such that when modules
i and j are both assigned to row r, either Z(r,i,j) or Z(r,j,i) should be
equal to 1, otherwise Z(r,i,j) = Z(r,j,i) = 0
forall(m in 1..N_md_i) do
    aux := m+1
    forall(n in aux..N_md_f) do
        forall(r in R) do
            Z(r,m,n) + Z(r,n,m) <= Y(m,r)
            Z(r,m,n) + Z(r,n,m) <= Y(n,r)
            Z(r,m,n) + Z(r,n,m) + 1 >= Y(m,r) + Y(n,r)
        end-do
    end-do
end-do

!Determine lower bounds on the width and area of a layout
forall(m in N_md, r in R) do
    C_total >= X(m,r) + 0.5*A(m)*Y(m,r)
    X(m,r) - 0.5*A(m)*Y(m,r) >= 0
end-do

forall(r in R, m in N_md) A_fileira(r) >= B(m)*C_total - B(m)*M*(1 - Y(m,r))

!Determines the the total area of the resulting layout
A_total = A_fileira(1) + A_fileira(2) + L*C_total

!Determines whether modules i and j are in the same row
forall(m in 1..N_md_i) do
    aux := m+1

```

```

        forall(n in aux..N_md_f) do
            q(m,n) = sum(r in R) (Z(r,m,n) + Z(r,n,m))
        end-do
    end-do

!For the particular case of alfa = 1
forall(m in N_md) do
    C_total <= X(m,1) + A(m)/2 + M*((1-Y(m,1)) + sum(n in N_md | n<>m)
Z(1,m,n) + (1-l))
    C_total <= X(m,2) + A(m)/2 + M*((1-Y(m,2)) + sum(n in N_md | n<>m)
Z(2,m,n) + 1)
end-do

!Fixação de variáveis
!M-01 deve ser o módulo mais a vante
forall(n in N_md, r in R) Z(r,1,n) = 0

!M-09 e NITROGEN BACKUP devem estar em bombordo
Y(9,2) = 1
Y(20,2) = 1

!M-08, M-14, M-16 e os guindastes devem estar em boreste
Y(8,1) = 1
Y(14,1) = 1
Y(16,1) = 1
Y(18,1) = 1
Y(19,1) = 1

!M-14 deve estar dentro do raio de ação do guindaste de popa
0 <= dis1(1) - (X(19,1)-X(14,1))
dis1(1) - (X(19,1)-X(14,1)) <= 2*M*bin(1)
0 <= dis1(1) - (X(14,1)-X(19,1))
dis1(1) - (X(14,1)-X(19,1)) <= 2*M*bin(2)

!M-16 deve estar dentro do raio de ação do guindaste de popa
0 <= dis1(2) - (X(19,1)-X(16,1))
dis1(2) - (X(19,1)-X(16,1)) <= 2*M*bin(3)
0 <= dis1(2) - (X(16,1)-X(19,1))
dis1(2) - (X(16,1)-X(19,1)) <= 2*M*bin(4)

!M-08 deve estar dentro do raio de ação do guindaste de proa
0 <= dis1(3) - (X(18,1)-X(8,1))
dis1(3) - (X(18,1)-X(8,1)) <= 2*M*bin(5)
0 <= dis1(3) - (X(8,1)-X(18,1))
dis1(3) - (X(8,1)-X(18,1)) <= 2*M*bin(6)

!NITROGEN BACKUP deve estar dentro do raio de ação do guindaste de proa
0 <= dis2 - (X(18,1)-X(20,2))
dis2 - (X(18,1)-X(20,2)) <= 2*M*bin(7)
0 <= dis2 - (X(20,2)-X(18,1))
dis2 - (X(20,2)-X(18,1)) <= 2*M*bin(8)

forall(i in 1..3) dis1(i) <= 30
dis2 <= 10

!Módulos mais seguro devem estar a ré
forall(m in 1..10, n in 11..17, r in R) Z(r,m,n) = 0

!Variáveis de decisão
forall(m in N_md, r in R) do
    X(m,r) is_continuous
    Y(m,r) is_binary
end-do

forall(m in N_md, n in N_md) do
    v_pos(m,n) is_continuous
    v_neg(m,n) is_continuous
    q(m,n) is_binary

```



```

end-do

forall(m in N_md, n in N_md, r in R) Z(r,m,n) is_binary

forall(r in R) A_fileira(r) is_continuous

A_total is_continuous
C_total is_continuous
l is_binary

forall (i in 1..8) bin(i) is_binary
forall (i in 1..3) dis1(i) is_continuous
dis2 is_continuous

!Impressão de dados
fopen("Impressao de dados.txt",F_OUTPUT)

writeln("Module sizes [m]")
write("Module m A(m)          d\n")
forall(m in N_md) do
    write(strfmt(m,1), "          ",strfmt(A(m),1), "          ",strfmt(B(m),1), "\n")
end-do

writeln(" ")
writeln("Cost of material flow between modules, C_p(m,n) [$ /m]")
forall(m in N_md) do
    forall(n in N_md) do
        write(strfmt(C_p(m,n),1), "          ")
    end-do
    writeln(" ")
end-do

fclose(F_OUTPUT)

!optimizing parameters
setparam("XPRS_VERBOSE",true)          !faz com que a otimização vá sendo
escrita na tela
!setparam("XPRS_MIPABSCUTOFF",value)    !inserir o valor do limitante primal
conhecido
setparam("XPRS_MAXTIME",600)            !inserir o tempo máximo que o programa
irá rodar, em segundos

!resolver o subproblema
starttime := gettime
minimize(MinVal)

!reportando a saída
writeln("\n----- -- -----")
writeln("Impressao dos resultados da otimizacao do modelo")
writeln("----- -- -----")

!mipstatus: retorna o status da otimização inteira
mipstatus := getparam("XPRS_MIPSTATUS")

!lpstatus: retorna o status da relaxação linear
lpstatus := getparam("XPRS_LPSTATUS")

if (lpstatus = 5) then
    writeln ("\n Problema ilimitado!!!")
elif (mipstatus = 5) then
    writeln ("\n Problema inviavel!!!")
elif (mipstatus = 6) then
    writeln("\nResultado da Otimizacao = ", getobjval)
    writeln("\nCusto do Layout = ", Flow_cost.sol + C_area*A_total.sol)
    writeln("\nTempo de CPU (em segundos) = ",gettime-starttime)
    writeln("\nArea do Layout = ", A_total.sol)
    writeln("\nComprimento do Layout = ", C_total.sol)
    writeln("\nCusto de Area = ", C_area*A_total.sol)

```

```

        writeln("\nCusto de Tubulacao = ", Flow_cost.sol)
    end-if

    !Impressão dos resultados
    fopen("Impressao dos resultados.txt",F_OUTPUT)

    writeln("Abcissa do centro do modulo X(m,r) [m]")
    forall(m in N_md) do
        forall(r in R) do
            write(X(m,r).sol," ")
        end-do
        writeln(" ")
    end-do

    fclose(F_OUTPUT)

    exit(1)

end-model

```