



MEDIÇÃO DE COMPLEXIDADE NA CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DO
TOPSIDE DE UM FPSO

Renato Marques do Nascimento

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

Orientadores: Jean-David Job Emmanuel Marie
Caprace

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Rio de Janeiro
Julho de 2021

MEDIÇÃO DE COMPLEXIDADE NA CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DO
TOPSIDE DE UM FPSO

Renato Marques do Nascimento

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

Orientadores: Jean-David Job Emmanuel Marie Caprace
Virgílio José Martins Ferreira Filho

Examinada por: Prof. Jean-David Job Emmanuel Marie Caprace
Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho
Prof. Floriano Carlos Martins Pires Júnior
Prof. Edilson Fernandes de Arruda

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
JULHO DE 2021

Marques do Nascimento, Renato

MEDIÇÃO DE COMPLEXIDADE NA CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DO *TOPSIDE* DE UM FPSO/Renato Marques do Nascimento. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2021.

XV, 94 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Jean-David Job Emmanuel Marie Caprace

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Produção, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 90 – 94.

1. Complexidade. 2. Construção e Montagem. 3. Projeto. I. Job Emmanuel Marie Caprace, Jean-David *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção. III. Título.

*Dedico esta dissertação a minha
saudosa mãe, Lucia, que sempre
foi a minha maior incentivadora
nos estudos. Também dedico este
trabalho aos filhos Giovanna e
Matteo, esposa Andrea, irmão
Gustavo e ao pai José Antônio que
estiveram sempre comigo nesta
caminhada.*

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Jean-David por aceitar o desafio de desenvolver esta dissertação e que, desde o primeiro contato nas aulas de mestrado, sempre se colocou a disposição para orientar os estudos.

Gostaria de agradecer também ao Prof. Virgílio pelos conselhos e orientações, sempre muito pertinentes e bem-vindos.

Expresso aqui minha gratidão a Universidade Federal do Rio de Janeiro por proporcionar ensino público de qualidade e por contribuir com o desenvolvimento de alunos e profissionais.

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

MEDIÇÃO DE COMPLEXIDADE NA CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DO
TOPSIDE DE UM FPSO

Renato Marques do Nascimento

Julho/2021

Orientadores: Jean-David Job Emmanuel Marie Caprace

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Programa: Engenharia de Produção

A análise de complexidade é um método geralmente aplicado para avaliar e otimizar os processos de projeto, fabricação e montagem de produtos. No entanto, muitos projetos não planejam suas atividades com base na análise de complexidade, e sim, pelo peso dos elementos, pela produtividade média e pelo homem-hora disponível. O objetivo deste estudo é fornecer uma variedade de índices de complexidade, com base no projeto detalhado, para obtermos um planejamento eficiente, dentro dos custos e prazos previstos. A aplicação e validação em projetos reais indicam que existe uma correlação significativa entre índice de complexidade, percepção de profissionais experientes e dados de projetos realizados.

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

COMPLEXITY MEASUREMENT IN THE CONSTRUCTION AND ASSEMBLY OF
A FPSO TOPSIDE

Renato Marques do Nascimento

July/2021

Advisors: Jean-David Job Emmanuel Marie Caprace
Virgílio José Martins Ferreira Filho

Department: Production Engineering

The complexity analysis is a method usually applied to evaluate and optimize the product design, manufacturing and assembly processes. However, many projects do not plan their activities based on the complexity analysis, instead they rely their planning on structural weight, average productivity and man hour available. The goal is to provide a variety of complexity index, based on project design, so that an efficient planning can be made in order to achieve the cost and schedule forecast. Application and validation on real projects indicate that there is a significant correlation between the complexity index, the engineer's judgement and project's database.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Abreviaturas	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Caracterização do Problema	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo Geral	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Justificativa e Relevância do Estudo	3
1.4 Estrutura do Estudo	5
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1 Indústria Mundial do Petróleo	7
2.2 Indústria do Petróleo no Brasil	10
2.2.1 Pré-Sal	11
2.3 Indústria Naval no Brasil	12
2.4 Embarcações e Plataformas	13
2.5 FPSO	16
2.5.1 Planta de Processo (<i>Topside</i>)	18
2.5.2 Construção e Montagem	21
2.6 Complexidade	25
2.6.1 Definição	25
2.6.2 Estudos Relacionados	26
2.6.3 Métricas para Medir a Complexidade	28
3 MÉTODO	36
3.1 Caracterização do Estudo	36
3.2 Limitações do Estudo	36

4	DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE ANÁLISE DE COMPLEXIDADE	38
4.1	Processo de Fabricação e Montagem de Tubulação	38
4.1.1	Engenharia	39
4.1.2	Aquisição de Materiais	40
4.1.3	Fabricação	42
4.1.4	Montagem	47
4.1.5	Comissionamento	48
4.2	Processo de Soldagem de Tubulação	50
4.2.1	Tipos de Solda	50
4.2.2	Posicionamento de Soldagem	52
4.2.3	Ensaio Não-Destrutivo	53
4.2.4	Complexidade de Soldagem	55
4.2.5	Tipos de Juntas	55
4.3	Densidade	59
4.4	Modelo Proposto	60
4.4.1	Complexidade de Forma	61
4.4.2	Complexidade de Montagem	61
4.4.3	Complexidade de Material	62
4.4.4	Complexidade de Soldagem	62
4.4.5	Complexidade de Densidade	64
5	ESTUDO DE CASO	65
5.1	Características Gerais dos FPSOs	65
5.2	Complexidade dos FPSOs	71
5.3	Análise das Correlações	78
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	85
6.1	Resultado da Pesquisa	85
6.2	Resultado das Correlações	86
6.3	Limitações do Estudo	86
7	CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS	88
	Referências Bibliográficas	90

Lista de Figuras

1.1	Produção Mundial de Petróleo <i>Onshore</i> e <i>Offshore</i>	1
1.2	Número de publicações em <i>complexity</i> e <i>assembly</i> na base científica SCOPUS.	5
2.1	Matriz Energética Mundial.	7
2.2	Reserva Mundial de Óleo por País.	8
2.3	Reserva Mundial de Gás por País.	8
2.4	Produção Mundial de Óleo e Gás.	9
2.5	Linha do tempo da indústria do petróleo no Brasil	11
2.6	Localização Geográfica do Pré-Sal Brasileiro	12
2.7	Crescimento na Utilização de FPSOs	18
2.8	Fluxograma Simplificado da Planta de Processo de uma FPSO	21
2.9	Fluxograma do processo de fabricação e montagem de tubulações	24
2.10	Influência da complexidade de componentes e partes no custo.	26
2.11	Índice de complexidade do produto, segundo [1].	30
4.1	Criação do Sistema de Tubulação	38
4.2	Hierarquia da Tubulação	39
4.3	Isométrico de Tubulação	40
4.4	Tipos de Materiais de Tubulação	41
4.5	Ferramentas e Máquinas de Corte e Bisel	43
4.6	Ferramentas e Máquinas de Ajuste	44
4.7	Esquemas de Aplicação de Tintas	46
4.8	Preservação dos Spools	46
4.9	Típico <i>Layout</i> de um <i>Pipe-Shop</i>	47
4.10	Desenho das Posições de Solda	53
4.11	Junta de Topo	56
4.12	Tipos de Chanfro	56
4.13	Junta de Ângulo	57
4.14	Junta Roscada	57
4.15	Junta “Boca de Lobo”	58

4.16	Junta de Suporte	59
4.17	Densidade dos Módulos	60
4.18	Área da Junta de Topo	62
4.19	Área da Junta de Ângulo	63
4.20	Área da Junta “Boca de Lobo”	63
4.21	Área da Junta de Suporte	64
4.22	Limites dos Módulos	64
5.1	Unidade 1 - Quantidade de spools	67
5.2	Unidade 2 - Quantidade de spools	67
5.3	Unidade 1 - Peso (kg) por polegada	68
5.4	Unidade 2 - Peso (kg) por polegada	68
5.5	Unidade 1 - <i>Box Plot</i>	69
5.6	Unidade 1 - <i>Box Plot</i> , normalizado entre 0 e 1	69
5.7	Unidade 1 - Histograma	69
5.8	Unidade 2 - <i>Box Plot</i>	70
5.9	Unidade 2 - <i>Box Plot</i> , normalizado entre 0 e 1	70
5.10	Unidade 2 - Histograma	70
5.11	Escala de Cores	71
5.12	Unidade 1 - Complexidade de Montagem (C_{as})	71
5.13	Unidade 1 - Complexidade de Material (C_m)	72
5.14	Unidade 1 - Complexidade de Forma (C_{sh})	72
5.15	Unidade 1 - Complexidade de Solda (C_{solda})	72
5.16	Unidade 1 - Complexidade de Densidade (C_d)	72
5.17	Unidade 1 - Complexidade Agregada	72
5.18	Unidade 2 - Complexidade de Montagem (C_{as})	73
5.19	Unidade 2 - Complexidade de Material (C_m)	73
5.20	Unidade 2 - Complexidade de Forma (C_{sh})	73
5.21	Unidade 2 - Complexidade de Solda (C_{solda})	73
5.22	Unidade 2 - Complexidade de Densidade (C_d)	73
5.23	Unidade 2 - Complexidade Agregada	74
5.24	Unidade 1 - Relação entre Indicador, Peso e Pesquisa	76
5.25	Unidade 2 - Relação entre Indicador, Peso e Pesquisa	77
5.26	Unidade 1 e 2 (spool) - Correlação (C_{sh} , C_{solda})	78
5.27	Unidade 1 e 2 (spool) - Correlação (C_{sh} , C_{solda} , base log10)	79
5.28	Unidade 1 e 2 (spool) - Correlação Matricial	79
5.29	Unidade 1 e 2 (linha) - Correlação (C_{sh} , C_m , C_{as} , C_{solda})	79
5.30	Unidade 1 e 2 (linha) - Correlação (C_{sh} , C_m , C_{as} , C_{solda} , base log10)	80
5.31	Unidade 1 e 2 (linha) - Correlação Matricial	80

5.32	Unidade 1 e 2 (linha) - Correlação Matricial, base log10	80
5.33	Unidade 1 e 2 (linha) - Correlação (C_{sh} , C_m , C_{as} , C_{solda} , C_d)	81
5.34	Unidade 1 e 2 (linha) - Correlação (C_{sh} , C_m , C_{as} , C_{solda} , C_d , base log10)	81
5.35	Unidade 1 e 2 (módulo) - Correlação Matricial	81
5.36	Unidade 1 e 2 (módulo) - Correlação Matricial, base log10	82
5.37	Resultado do PCA	83
5.38	Resultado Árvore de Decisão	84

Lista de Tabelas

2.1	Principais <i>Majors</i> na produção de óleo e gás	10
2.2	Estaleiros Brasileiros de Médio e Grande Porte	13
2.3	Tipos de Plataformas	16
2.4	Tipos de Materiais	24
4.1	Características dos Tipos de Aços	42
4.2	Posição de Soldagem	52
5.1	Pesquisa com os Especialistas	74

Lista de Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 40
AC	aço carbono, p. 23
AHTS	<i>Anchor Handling Tug Supply</i> , p. 14
AI	aço inoxidável, p. 23
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível, p. 11
ANSI	<i>American National Standards Institute</i> , p. 40
API	<i>American Petroleum Institute</i> , p. 40
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i> , p. 40
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> , p. 40
AWS	<i>American Welding Society</i> , p. 52
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, p. 13
CN	cobre-níquel, p. 23
C&M	Construção e Montagem, p. 21
DIN	<i>Deutsche Industrial Norme</i> , p. 40
DP	aço duplex, p. 23
DSV	<i>Diving Support Vessel</i> , p. 14
END	Ensaio Não Destrutivos, p. 45
E&P	Exploração e Produção, p. 1
FPSO	<i>Floating, Production, Storage and Offloading</i> , p. 1
FRP	<i>Fiber Reinforced Polymer</i> , p. 23

FSO	<i>Floating, Storage and Offloading</i> , p. 15
HH	Homem-Hora, p. 4
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, p. 12
IV	Inspeção Visual, p. 54
LH	<i>Line Handling</i> , p. 14
LP	Líquidos Penetrantes, p. 54
MPSV	<i>Multipurpose Supply Vessel</i> , p. 14
OSRV	<i>Oil Spill Recovery Vessel</i> , p. 14
PLSV	<i>Pipe Laying Support Vessel</i> , p. 14
PM	Partículas Magnéticas, p. 54
PSV	<i>Platform Supply Vessel</i> , p. 14
PVC	Policloreto de Vinila, p. 23
RSV	Research Supply Vessel, p. 14
RX	Radiografia, p. 54
SD	aço superduplex, p. 23
SINAVAL	Sindicato Nacional da Indústria da Construção e Reparação Naval e <i>Offshore</i> , p. 13
TH	Teste Hidrostático, p. 48
TLP	<i>Tension Leg Platform</i> , p. 15
ULCC	<i>Ultra Large Crude Carrier</i> , p. 17
US	Ultrasom, p. 54
VLCC	<i>Very Large Crude Carrier</i> , p. 17
bcm	<i>billion cubic meters</i> , p. 8
bpd	<i>barrels per day</i> , p. 8

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1. Caracterização do Problema

Por ser um recurso energético não-renovável, a Exploração e Produção (E&P) de petróleo e gás torna-se uma tarefa cada vez mais desafiadora. A busca incessante por este recurso favoreceu o desenvolvimento de tecnologias cada vez mais sofisticadas que permitiram a indústria do óleo e gás manter o ritmo de crescimento da produção e ir além da produção *onshore* para a produção *offshore*. A produção *offshore* de petróleo, em 2015, atingiu seu nível máximo de produção com mais de 30% do total da produção mundial (ver Figura 1.1).

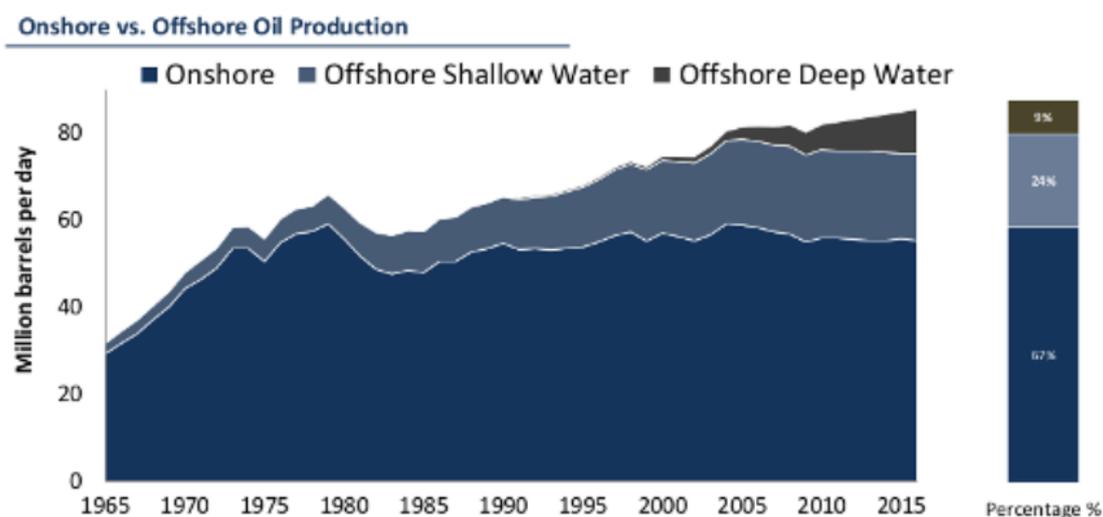


Figura 1.1: Produção Mundial de Petróleo *Onshore* e *Offshore*.

Fonte: *Energy and Capital* [2].

Um dos principais recursos considerados críticos para o &P e que possibilita a produção de óleo e gás em águas profundas e ultra-profundas, ou seja, em sistemas *offshore*, o FPSO (termo em inglês para *Floating, Production, Storage and Offloading*) tem-se revelado como recurso fundamental para o crescimento da produção de óleo e gás, prin-

principalmente no Brasil, onde 90% da produção concentra-se no *offshore*. Para operar um FPSO são necessários diversos sistemas como planta de processamento de óleo, gás e água, sistemas navais, sistemas de segurança e combate a incêndio, geração de energia, sistemas de telecomunicações, automação e controle, entre muitos outros.

A construção e montagem de um FPSO, portanto, é uma atividade relativamente complexa de ser executada, pois envolve diversos campos da engenharia, com uma relação de dependência e um nível de interface muito elevado entre eles. Como essas unidades de produção precisam atender às características particulares de seus respectivos campos de produção, unidades idênticas são raramente encontradas, o que dificulta a automação em toda sua cadeia de processo. Por este fato, a construção e montagem de uma FPSO é caracterizada pelo uso intensivo de mão de obra (direta e indireta) qualificada para atender a todos os requisitos necessários que possibilitem esta unidade de produzir e operar. Além da mão de obra, outros recursos são necessários para completar as atividades de construção e montagem como projeto detalhado, máquinas e equipamentos, materiais, ferramentas, energia, etc.

Melhorar o processo construtivo de um FPSO revela-se um desafio. A padronização e automação tão almejada, nem sempre é viável. Por isso, é fundamental o investimento na gestão de um projeto desse porte. Pesquisas e inovações na gestão de projeto pode ser um diferencial competitivo para a indústria naval. A etapa de planejamento das atividades é essencial para que a equipe de projeto elabore seu plano de execução e controle qualquer desvio. Um planejamento bem elaborado pode ser essencial para que as atividades ocorram dentro do custo e prazo estimados, minimizando atrasos, retrabalhos e improdutividades.

A Análise de Complexidade é um método normalmente utilizado para avaliar e otimizar o *design* de um produto, seus processos de fabricação e montagem e seu gerenciamento operacional. Tem-se como objetivo neste estudo verificar como a complexidade pode influenciar no desempenho do projeto e afetar o seu sucesso. Alguns estudos empíricos tem demonstrado que a complexidade de um projeto pode afetar sua duração, custo e qualidade [3–5].

Assim, a principal questão que caracteriza a problematização deste estudo é:

➡ Como a Análise de Complexidade pode apoiar a equipe de projeto no desenvolvimento de um planejamento mais eficiente e determinar custos e prazos em um projeto de alta complexidade?

Este trabalho tem o potencial de contribuir fortemente para a aplicação da Análise de Complexidade como um poderoso mecanismo de planejamento e controle de um projeto de construção e montagem de um FPSO, contribuindo para tornar a indústria naval cada vez mais competitiva.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Considerando o contexto apresentado, este estudo tem como objetivo geral verificar a relação entre o modelo de complexidade e análise de especialistas, além de verificar a relação entre duração das atividades de construção e montagem de uma FPSO com a complexidade do projeto. Para isso, deverá ser feita uma análise de complexidade, utilizando como base os dados de projeto de FPSOs construídas no Brasil e comparando seus resultados com pesquisa realizada por especialistas e com as durações realizadas nos projetos.

1.2.2. Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral do estudo seja alcançado, outros objetivos mais específicos devem ser verificados, a saber:

- medir a complexidade na construção e montagem de um FPSO, considerando os diversos sistemas, formas, materiais, acessibilidade, etc.
- realizar pesquisa com especialistas no processo de construção e montagem de FPSO para determinar a correlação entre os indicadores de complexidade medidos *versus* os resultados da pesquisa.
- verificar a duração realizada do processo de construção e montagem em um projeto de um FPSO.
- relacionar a duração das atividades e a complexidade de execução.
- apresentar a duração das atividades a partir da complexidade medida.
- desenvolver um modelo de planejamento baseado em índices de complexidade.

1.3. Justificativa e Relevância do Estudo

Plataformas do tipo FPSO são unidades de produção que devem ser adaptadas para as características de óleo, gás, água, sedimentos e contaminantes que irão produzir. Os reservatórios de petróleo podem conter diferentes volumes de óleo, gás e água (saturação), diferentes composições químicas do óleo e do gás, diferentes condições de pressão, permeabilidade, mobilidade, compressibilidade. Na engenharia de reservatórios são estudadas a caracterização das jazidas, as propriedades das rochas, as propriedades dos fluidos nelas contidos, a maneira como estes fluidos interagem dentro da rocha e as leis físicas

que regem o movimento dos fluidos em seu interior, com o objetivo de maximizar a produção de hidrocarbonetos [6]. Portanto, o projeto de uma FPSO tem que ser elaborado e detalhado para atender as características e requisitos técnicos de cada reservatório.

Por essa razão, as FPSOs normalmente possuem diferentes tamanhos, unidades de processos, capacidade de produção e armazenamento. Até mesmo os projetos de FPSOs considerados “clones” possuem distinções técnicas que as tornam únicas. A padronização dos projetos de FPSO tem sido um desafio para os projetistas e empresas que atuam no ramo. Os efeitos da padronização poderiam resultar em economias de escala, maior previsibilidade das atividades e ganhos de produtividade devido à curva de aprendizagem.

Assim, entende-se que cada FPSO possui um nível de complexidade possível de ser medido e avaliado para formação de um conceito ou indicador de complexidade. Podemos perceber que há uma demanda por indicadores de complexidade na construção e montagem de FPSOs, de modo a avaliar a complexidade que aquela unidade exige para sua implementação. Medidas de complexidade para o produto são normalmente utilizadas por projetista na tomada de decisão, auxiliando-o a projetar um produto mais rentável e de fabricação e montagem mais econômicas [7].

Atualmente, as práticas da indústria ainda avaliam a duração das atividades com base na quantidade de homem-hora (HH) necessária para completar a tarefa. Este homem-hora é alcançado pelo índice de produtividade, observado através do histórico de execução de projetos passados, vezes carga de trabalho, comumente expresso pelo peso ou pelo quantitativo de determinada tarefa. Como resultado, o sistema de planejamento é incapaz de capturar as dificuldades que uma área de trabalho específica pode ter. Não obstante, o próprio sistema de HH não consegue prever a quantidade de tempo e recursos necessários sem a introdução dos conceitos como materiais diferentes, geometria das peças, forma das peças, dificuldade de montagem, densidade de área, etc.

Diante do conceito de *Design* do Produto, os indicadores de complexidade também permitem buscar o melhor *design* para um determinado produto e os impactos de eventuais alterações, favorecendo a otimização dos processos envolvidos. Por esse aspecto, os indicadores de complexidade podem ser uma alternativa na análise de custo e prazo, a depender somente das características do produto, independente do local de fabricação ou construção.

Por estes motivos, podemos perceber o grau de relevância dos indicadores de complexidade, seja em termos de otimização de projeto, tempo e custos de fabricação e montagem e qualidade do produto final. O estudo da complexidade pode ser um fator determinante no incremento da produtividade e, conseqüentemente, na vantagem competitiva da indústria naval.

O presente estudo tem a oportunidade de analisar os dados realizados de um projeto real de uma FPSO, construída com mais de 60% de conteúdo nacional, e medir sua complexidade a partir do projeto detalhado. Dessa forma, este estudo se propõe a ava-

liar a relação que existe entre o tempo de fabricação e montagem com a complexidade do projeto e, com isso, elaborar os critérios de planejamento das atividades a partir de indicadores de complexidade.

Dentro do universo de publicações que abordam a complexidade em geral, o número de estudos que possuem essa abordagem voltada para o área de construção e montagem é bastante reduzido, como mostrado na Figura 1.2. A pesquisa foi feita ano a ano, de 2000 a 2017, utilizando a base científica de dados SCOPUS. A palavra-chave “*complexity*” foi inicialmente empregada, utilizando o filtro *Keywords* (colunas verdes). Posteriormente, foram adicionadas à pesquisa as palavras-chave “*assembly OR manufacture*” (colunas vermelhas). Outros filtros aplicados para a pesquisa foram: *articles, reviews, engineering, english*.

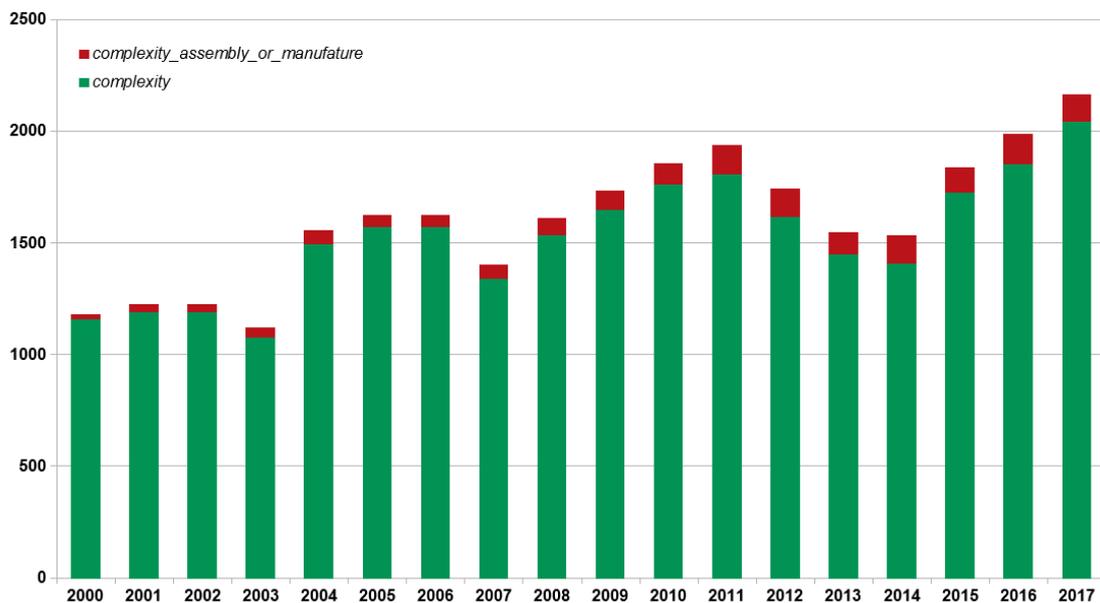


Figura 1.2: Número de publicações em *complexity* e *assembly* na base científica SCOPUS.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Do ponto de vista acadêmico, ao analisar a frequência dos artigos relacionados, é possível perceber que o tema vem crescendo de forma individual, mas com pouca produção na interseção, fato que reforça sua importância, ao mesmo tempo que evidencia uma possível lacuna teórica no que tange ao tema a ser estudado.

1.4. Estrutura do Estudo

A Introdução procurou situar o leitor para o contexto geral referente ao estudo a ser desenvolvido. O problema do estudo foi apresentado, bem como os objetivos e as razões que o justificam e o tornam relevante.

O presente estudo está estruturado em diversas seções, além desta Introdução, a saber:

- seção 2 trata da fundamentação teórica no que diz respeito à Indústria do Petróleo e Naval, destaca a importância de um FPSO e um resumo em relação à planta de processo e às atividades de construção e montagem. Além disso, temas relacionados à Complexidade, como métodos de medição e técnicas atuais também são discutidos.
- seção 3 apresenta o método que será utilizado na execução do estudo e os dados que serão utilizados para desenvolvê-lo, além das limitações do estudo.
- seção 4 aborda sobre o desenvolvimento do modelo de complexidade no processo de fabricação e montagem de tubulação, bem como a apresentação do modelo proposto.
- seção 5 apresenta um estudo de caso de forma a validar e dar maior robustez aos objetivos do estudo e suas conclusões.
- seção 6 faz uma análise dos resultados obtidos dos indicadores de complexidade, comparando-os com os resultados da pesquisa com especialistas e com as durações realizadas em projetos anteriores.
- seção 7 apresenta as considerações finais sobre o estudo, além de propor recomendações de melhorias futuras, para que a análise de complexidade seja aplicada e desenvolvida pela indústria.

Capítulo 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Indústria Mundial do Petróleo

O petróleo e o gás natural se destacam como energias de maior relevância na matriz energética mundial, contando com uma participação de aproximadamente 50%. Desde a meados do século XX, o óleo e gás vêm apresentando crescimento e, de acordo com as projeções de demanda por energia, esses hidrocarbonetos ainda configurarão como de grande importância na matriz energética (ver Figura 2.1).

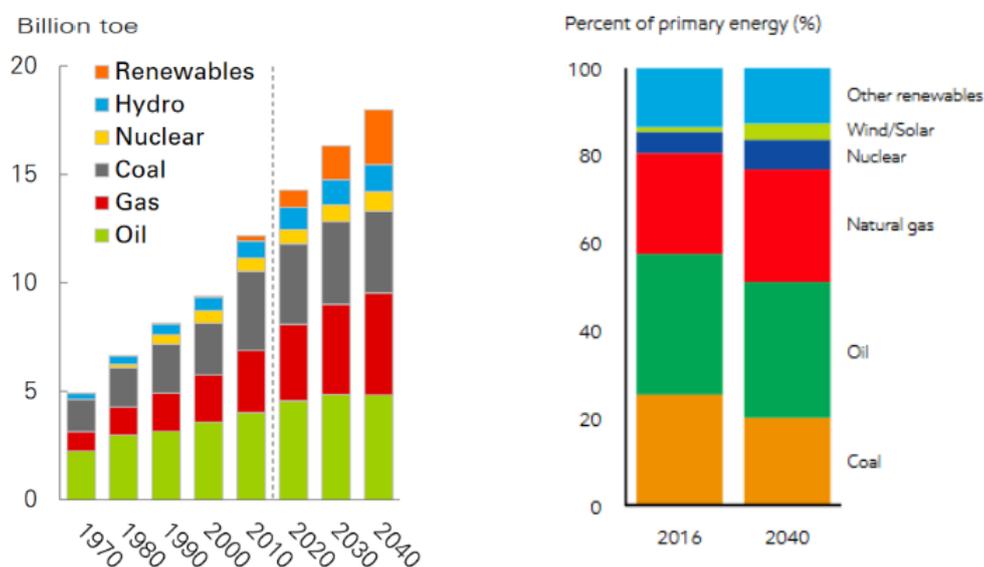


Figura 2.1: Matriz Energética Mundial.

Fonte: *BP Statistical Review of World Energy*.

De acordo com as estimativas de reservas de óleo e gás mundiais, o petróleo atinge a marca de reservas provadas de 239,3 bilhões de barris, enquanto o gás natural de 6.831 trilhões de pés cúbicos (ver Figura 2.2 e 2.3).

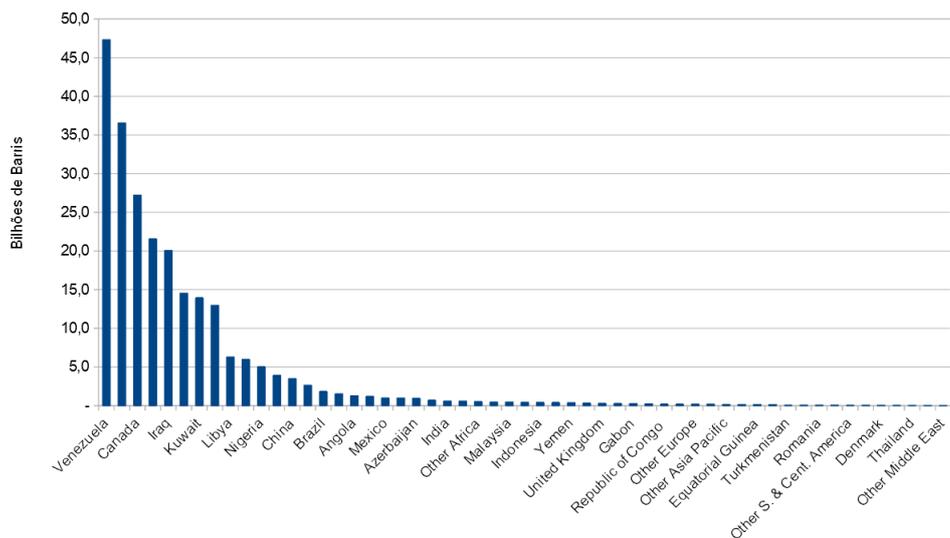


Figura 2.2: Reserva Mundial de Óleo por País.

Fonte: Adaptado do site *BP Statistical Review of World Energy* (2018).

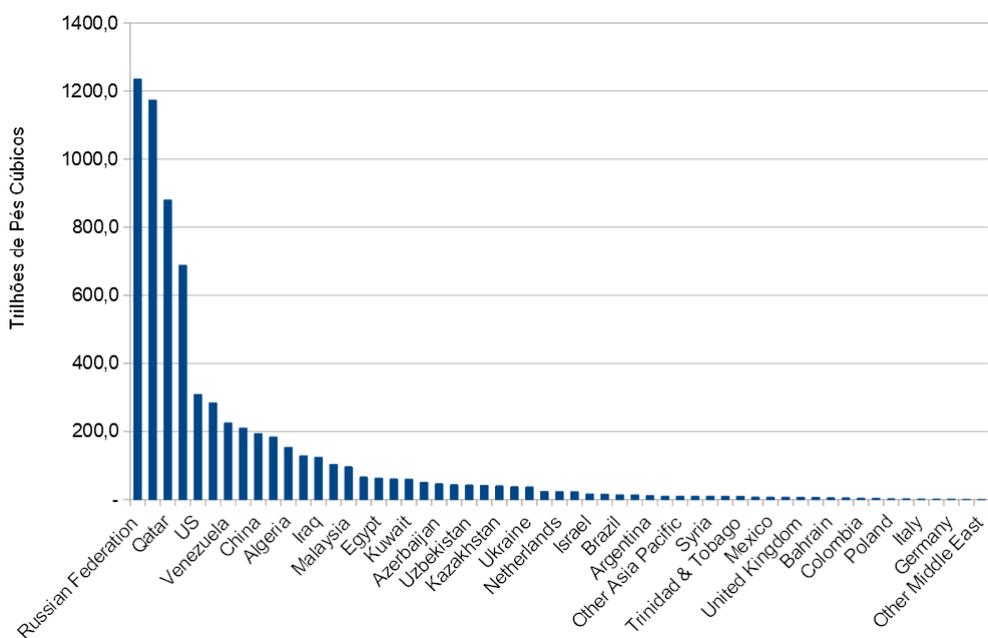


Figura 2.3: Reserva Mundial de Gás por País.

Fonte: Adaptado do site *BP Statistical Review of World Energy* (2018).

Atualmente, a produção de óleo e gás natural atingiram a incrível marca de 92,6 milhões de barris por dia (*barrels per day - bpd*) e 3,68 bilhões de metros cúbicos (*billion cubic meters - bcm*), respectivamente (ver Figura 2.4).

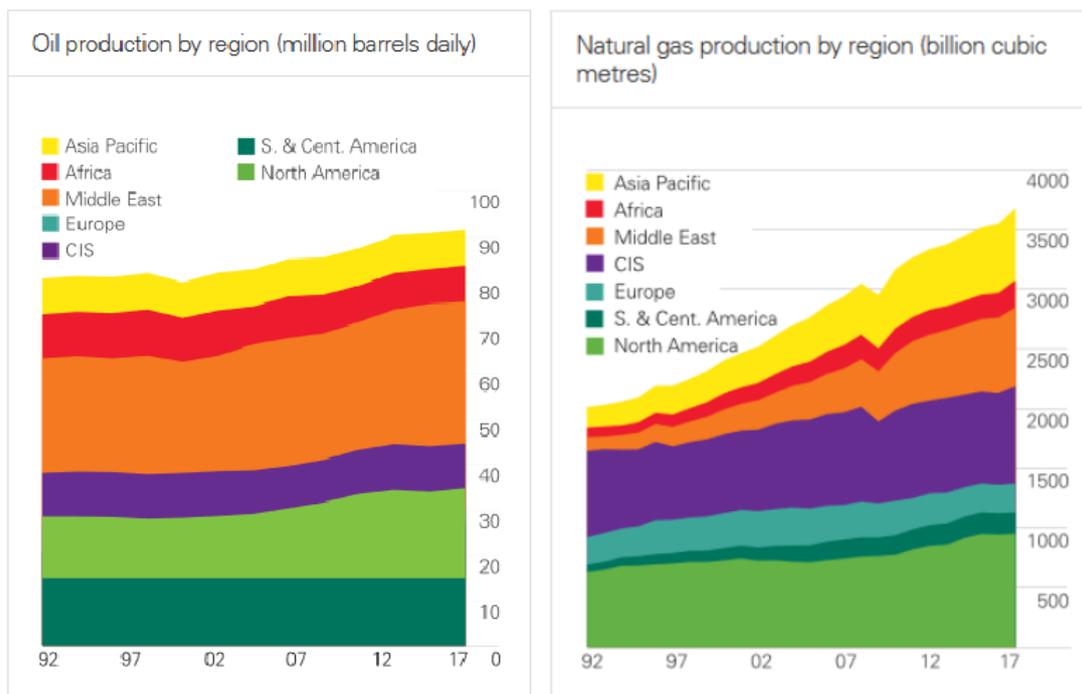


Figura 2.4: Produção Mundial de Óleo e Gás.
 Fonte: BP Statistical Review of World Energy (2018).

A indústria do óleo e gás é caracterizada por dois grandes segmentos: *upstream* e *downstream*. O primeiro, conhecido como Exploração e Produção (E&P) representa a fase extrativista, abrangendo as atividades de desenvolvimento (estudos geológicos e geofísicos), produção e transporte antecedente ao refino. Representa uma fase de alto investimento financeiro, com pesados investimentos em estudos dos reservatórios, perfuração de poços, instalação de engenharia submarina e instalação de unidades estacionárias de produção. O *downstream* representa a fase de refino, transporte e distribuição dos derivados de óleo e gás. A integração desses dois segmentos permitem flexibilidade da cadeia produtiva e provê um hedge natural, reduzindo risco e volatilidade por meio a junção da estabilidade de um caixa de longo prazo com atividades mais arriscadas, otimizando a cadeia de valor [8].

Podemos observar pelo exposto que estamos diante de um recurso crítico para o abastecimento energético mundial e, apesar de ser um recurso não-renovável, sua produção ainda se perpetuará ao longo de muitos anos. Por ser um recurso de grande relevância energética, é fácil perceber que trata-se de recurso precioso, motivo de cobiça de grandes nações representadas por suas empresas multinacionais. A Tabela 2.1 apresenta a produção de óleo e gás por empresa.

Tabela 2.1: Principais *Majors* na produção de óleo e gás

RANK	EMPRESA	PRODUÇÃO (em milhões de barris de óleo equivalente por dia (boepd))	PAÍS DE ORIGEM
1	Saudi Aramco	12	Arábia Saudita
2	Gazprom	8.3	Rússia
3	National Iranian Oil Co.	6	Irã
4	Exxon Mobil	4.7	Estados Unidos
5	Rosneft	4.7	Rússia
6	PetroChina	4	China
7	BP	3.7	Inglaterra
8	Royal Dutch Shell	3.7	Inglaterra/Holanda
9	Petroleos Mexicanos	3.6	México
10	Kuwait Petroleum Corp.	3.4	Kuwait
11	Chevron	3.3	Estados Unidos
12	Abu Dhabi National Oil Co.	3.1	Emirados Árabes Unidos
13	Total	2.5	França
14	Petrobras	2.4	Brasil
15	Qatar Petroleum	2.4	Qatar
16	Lukoil	2.3	Rússia
17	Sonatrach	2.2	Argélia
18	Iraq Ministry of Oil	2	Iraque
19	PDVSA	2	Venezuela
20	Statoil	2	Noruega

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Podemos analisar da tabela acima que das 20 maiores empresas produtoras de óleo e gás do mundo, 15 são de controle estatais – e controlam 80% das reservas mundiais. As outras cinco empresas são privadas – duas norte-americanas, uma inglesa, uma anglo-holandesa e uma francesa – e controlam menos de 15% da oferta mundial do petróleo. Por isso, podemos afirmar que nos dias de hoje as principais decisões relativas ao petróleo – da definição dos preços ao traçado das grandes estratégias – são tomadas pelos Estados nacionais e suas grandes empresas públicas.

2.2. Indústria do Petróleo no Brasil

No caso brasileiro, o mercado extrativo e de produção de derivados começou a ganhar preponderância a partir da década de 70, fruto das descobertas de óleo na Bacia de Campos e do aumento da demanda interna [8]. Nesta época, os grandes investimentos giravam principalmente em torno do desenvolvimento do parque de refino, capitaneada pela empresa estatal nacional PETROBRAS.

A primeira fase das descobertas na Bacia de Campos fez a empresa direcionar seus esforços para o upstream, concentrando boa parte dos seus investimentos da PETROBRAS no desenvolvimento da nova área. Com as sucessivas descobertas de novos reservatórios ao longo das décadas seguintes, a PETROBRAS se consolidou em regime monopolista até a abertura de mercado em 1997. Podemos verificar na Figura 2.5 um resumo da história do petróleo no Brasil.

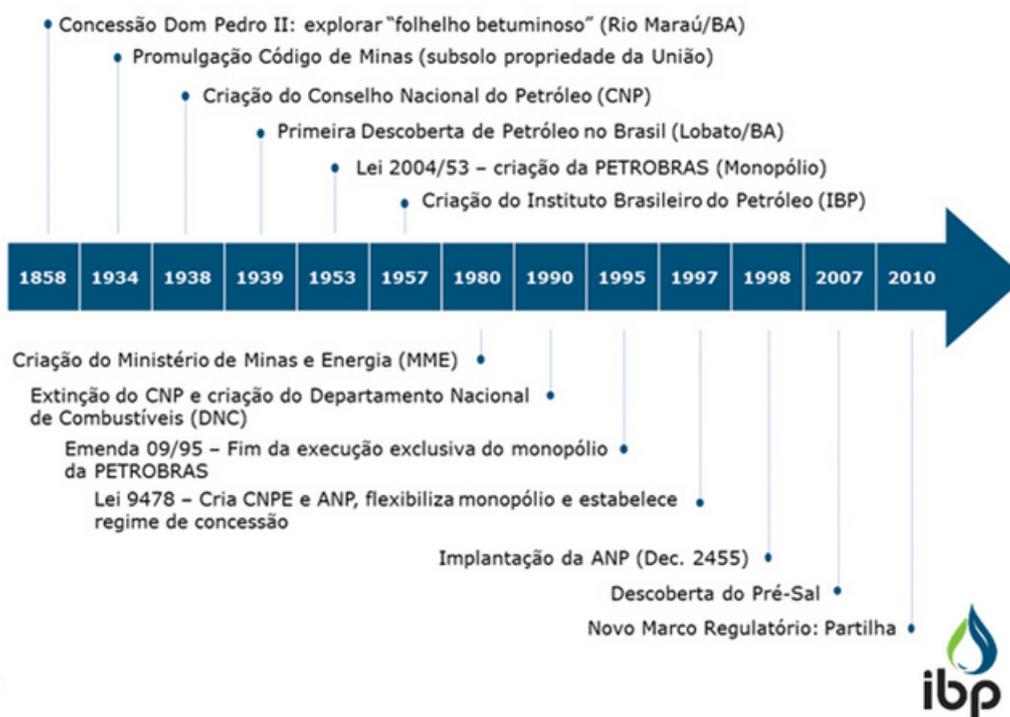


Figura 2.5: Linha do tempo da indústria do petróleo no Brasil
 Fonte: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP).

Atualmente no Brasil, a produção de óleo e gás concentra-se na área *offshore*, com mais de 90% da produção nacional, principalmente nas áreas da Bacia de Campos, Bacia de Santos e Bacia do Espírito Santo. Hoje, o Brasil é o segundo maior produtor de óleo e gás *offshore* mundial e um importante *player* no desenvolvimento de tecnologias para Exploração e Produção (E&P) *offshore*.

Apenas em E&P, o investimento no Brasil por parte das operadoras ao longo dos últimos 10 anos foi superior a US\$ 220 bilhões, sendo cerca de 80% deste valor representado por investimentos da PETROBRAS. Em dezembro de 2017, foram declarados no Brasil cerca de 12,8 bilhões de barris de reservas provadas (1P) e 23,6 bilhões de barris de reservas Provadas, Prováveis e Possíveis (3P) com potencial de aumento significativo deste valor após incorporação de volumes de reservas em novas áreas do pré-sal. Com relação ao gás natural, foram declarados 369,9 bilhões de metros cúbicos de reservas (1P) e 609,2 bilhões de metros cúbicos de reservas (3P).

2.2.1. Pré-Sal

Descoberto pela primeira vez em 2007 no litoral brasileiro, o Pré-Sal hoje representa cerca de 54% da produção de óleo e gás segundo dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP). Essa província é composta por grandes acumulações de óleo leve, de excelente qualidade e com alto valor comercial. Por situar-se em águas ultra-profundas e longe da costa brasileira, o desenvolvimento do campo de explo-

ração passa a ser de grande desafio, exigindo a necessidade de recursos críticos como: navios-sondas para exploração do reservatório; sondas de perfuração para perfuração dos poços de produção e injeção; sistema submarinos de *manifolds* e dutos de escoamento da produção; e unidades de produção flutuantes, que realizam o processamento primário de separação do óleo, gás e água, além de operar por um longo período de tempo. A Figura 2.6 mostra a localização geográfica do campos descobertos até hoje no litoral brasileiro.



Figura 2.6: Localização Geográfica do Pré-Sal Brasileiro

Fonte: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP).

2.3. Indústria Naval no Brasil

Para atender a gama de serviços necessários para desenvolvimento, exploração e produção (E&P) dos campos de produção de óleo e gás *offshore* do Brasil, é de grande relevância o desenvolvimento da indústria naval nacional.

Depois de um longo período de estagnação, a indústria naval brasileira retomou o crescimento a partir dos anos 2000, com a retomada de investimentos na expansão e na modernização da capacidade produtiva e com a decisão de construir as plataformas e embarcações de apoio *offshore* destinadas o setor de óleo e gás em estaleiros nacionais [9]. Tal fato decorreu, principalmente, do crescimento das atividades petrolíferas *offshore*, que acarretou a necessidade de novas embarcações para esse mercado e de uma política voltada ao desenvolvimento da indústria nacional. A política de conteúdo local, as novas encomendas da PETROBRAS e o aumento da produção *offshore* fizeram com que o setor avançasse, em média, 19,5% ao ano entre 2000 e 2013, segundo dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). As empresas de petróleo e gás efetuaram grandes

encomendas aos estaleiros nacionais, enquanto a União atuou, entre outros, com exigências de percentual mínimo de conteúdo local nas atividades de exploração e produção e com a criação de um fundo garantidor à indústria [10].

A capacidade instalada de processamento de aço no país, referente a estaleiros de médio e grande portes, totaliza atualmente 529 mil toneladas/ano, ocupando uma área de 3,97 milhões de m^2 (ver Tabela 2.2). Os estaleiros de médio porte são aqueles com capacidade de produção de pequenas e médias embarcações, atualmente especializados na construção de embarcações de apoio marítimo. Com relação aos estaleiros de grande porte, voltados à construção de grandes embarcações, destacam-se o EISA, o BRASFELS e o MAUÁ, no estado do Rio de Janeiro, o RIO GRANDE, no Rio Grande do Sul, e o ATLÂNTICO SUL, em Pernambuco [10].

Tabela 2.2: Estaleiros Brasileiros de Médio e Grande Porte

Estaleiros	Processamento de Aço (mil ton/ano)	Estado	Área (mil m^3)
EISA	52	Rio de Janeiro	150
Brasfels	50	Rio de Janeiro	410
Rio Nave	48	Rio de Janeiro	150
Enavi-Renave	40	Rio de Janeiro	200
Mauá	36	Rio de Janeiro	334
STX	15	Rio de Janeiro	120
Aliança	10	Rio de Janeiro	61
Superpesa	10	Rio de Janeiro	96
SRD	10	Rio de Janeiro	85
UTC	n. d.	Rio de Janeiro	112
Detroit	10	Santa Catarina	90
Maclaren Oil	6	Rio de Janeiro	30
Wilson Sons	10	São Paulo	22
Navship	15	Santa Catarina	175
Itajaí	12	Santa Catarina	177
Rio Grande	30	Rio Grande do Sul	100
Quip	0	Rio Grande do Sul	70
Atlântico Sul	160	Pernambuco	1500
Inace	15	Ceará	180

Fonte: [9] e [11] .

2.4. Embarcações e Plataformas

As plataformas *offshore* podem ser classificadas de várias formas, como, por exemplo, pela finalidade (perfuração de poços, produção, armazenamento, etc.), pela mobilidade (fixas ou móveis), pelo tipo de ancoragem, etc. As plataformas *offshore* têm sua utilização condicionada a alguns aspectos relevantes como a profundidade da lâmina d'água, relevo do solo submarino, capacidade de armazenamento e a melhor relação de custo-benefício. Podemos citar diversos tipos de embarcações principais, além de embarcações de apoio, que implementam as atividades de exploração, desenvolvimento, produção e operação *offshore*, entre outros. Podemos resumir da seguinte forma:

- AHTS (*Anchor Handling Tug Supply*) : Embarcação que pode medir entre 60 e 80 metros de comprimento e potência (HP) de 6.000 a 20.000 atua com rebocador, manuseio de âncoras e transportes de suprimentos (tubos, água doce, óleo, lama, salmoura, cimento, peças, etc.).
- CREWBOAT: Utilizado no transporte rápido da tripulação e de outras equipes que atuam nas plataformas.
- LH (*Line Handling*) : Embarcação utilizada no manuseio de espias (cabos de amarração). Tem cerca de 35 metros de comprimento e potência em torno de 1.800 HP.
- MPSV (*Multipurpose Supply Vessel*) : Navio multitarefa, suprimento (cimento, tubos, lama, salmoura, água doce, óleo e granés) e manuseio de âncoras.
- OSRV (*Oil Spill Recovery Vessel*) : Utilizado no combate ao derramamento de óleo dotado de especificações que permitem trabalhar na mancha de óleo, em atmosfera onde a evaporação do petróleo produz gás natural, por isso é dotado de sistemas elétricos blindados.
- PSV (*Platform Supply Vessel*) : Utilizado no apoio às plataformas de petróleo, transportando material de suprimento: cimento, tubos, lama, salmoura, água doce, óleo, granéis. Mede de 60 a 100 metros de comprimento e HP em torno dos 5.000. Possui impelidores laterais (BHP).
- RSV (Research Supply Vessel) : Barco de apoio à pesquisa e coleta de dados sísmicos.
- RSV (*ROV Support Vessel*): Embarcação de apoio especializada em operação de ROV (*Remote Operate Vehicle*), pequeno veículo operado do navio e que atua no fundo do mar através de braços mecânicos, luzes e lentes no manuseio e montagem de equipamentos submarinos offshore.
- DSV (*Diving Support Vessel*) : Embarcação empregada no apoio de mergulho em profundidade.
- Balsa de Serviço (*Barge*): Embarcação empregada em serviços gerais tais como lançamento de tubos, montagem, transporte de equipamentos e módulos.
- PLSV (*Pipe Laying Support Vessel*) : Embarcação destinada ao lançamento e posicionamento no fundo do mar de cabos de telecomunicações e flexíveis de produção de petróleo.

- Plataformas Fixas: Estruturas apoiadas no fundo do mar por meio de estacas cravadas no solo com o objetivo de permanecerem no local de operação por longo tempo.
- Plataformas Semisubmersíveis: compostas de uma estrutura de um ou mais conveses, apoiada por colunas em flutuadores submersos.
- Plataformas do Tipo FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*): sistemas flutuantes com capacidade de processar e armazenar o petróleo e prover o descarregamento do petróleo e/ou gás natural.
- Plataformas do Tipo FSO (*Floating, Storage and Offloading*) : idem às Plataformas do Tipo FPSO, porém sem a capacidade de processamento primário da produção.
- TLP (*Tension Leg Platform*) : unidades flutuantes utilizadas para a produção de petróleo. Sua estrutura é bastante semelhante à plataforma semisubmersível. Porém, sua ancoragem ao fundo do mar é diferente, as TLPs são ancoradas por estruturas tubulares, com os tendões fixos ao fundo do mar por estacas e mantidos esticados pelo excesso de flutuação da plataforma, o que reduz severamente os movimentos da mesma.
- SPAR: utilizadas para exploração em águas profundas. Sua estrutura é composta por um casco de seção transversal circular que se posiciona verticalmente na água, sustentada pelos tanques de flutuação localizados na parte superior da estrutura.
- Navio Aliviador: navio tanque especialmente desenvolvido para transportar óleo das plataformas (FSO, FPSO) para as refinarias. São geralmente utilizados em regiões onde o clima é desfavorável, regiões remotas ou águas profundas.

Em relação as plataformas de produção, pode ser observado na Tabela 2.3 as principais características dos tipos de plataformas que atuam na produção de óleo e gás *offshore*.

Tabela 2.3: Tipos de Plataformas

	Fixa	Autoelevável (ou autoelevatória ou jack-up)	Semissubmersível	FPSO	FPSO Monocoluna	TLWP (plataforma de pernas atirantadas)	Navio-Sonda
Lâmina d'água (profundidade no local da instalação/ operação)	Até 300 metros.	Até 150 metros.	Mais de 2.000 metros (pode ser instalada em grandes profundidades graças aos sistemas de ancoragem modernos).	Mais de 2.000 metros (pode ser instalada em grandes profundidades graças aos sistemas de ancoragem modernos).	Mais de 2.000 metros.	Até 1.500 metros.	Mais de 2.000 metros.
Como é	Funciona como uma estrutura rígida, fixada no fundo do mar por um sistema de estacas cravadas.	Tem pernas que se autoelevam. Ao chegar à locação, um mecanismo faz as pernas descerem e serem assentadas no solo marinho.	Plataforma flutuante, estabilizada por colunas. Pode ser ancorada no solo marinho ou dotada de sistema de posicionamento dinâmico, que mantém a posição da plataforma de forma automática.	Plataforma flutuante, convertida a partir de navios petroleiros, na maioria dos casos. Assim como a semissubmersível, é ancorada no solo marinho.	Tem as mesmas características da FPSO, mas seu casco tem formato cilíndrico.	Plataforma flutuante, de casco semelhante a uma semissubmersível. É ancorada no fundo do mar por cabos ou tendões de aço tracionados.	Plataforma flutuante com casco em forma de navio, usada para perfuração de poços. Pode ser ancorada no solo marítimo ou dotada de sistema de posicionamento dinâmico, que mantém a posição da embarcação de forma automática.
Atividade de perfuração	Sim.	Sim.	Sim (algumas podem ser só de produção).	Não.	Não.	Sim (só para a manutenção dos poços).	Sim.
Atividade de produção	Sim.	Não.	Sim (algumas podem ser só de perfuração).	Sim.	Sim (geralmente são unidades de perfuração ou de produção).	Sim.	Não.
Onde é feito o controle dos poços	Superfície.	Superfície.	Fundo do mar.	Fundo do mar.	Fundo do mar.	Superfície.	Fundo do mar.
Capacidade de armazenamento	Não.	Não.	Não.	Sim.	Sim.	Não.	Não.
Escoamento da produção	Oleodutos.	Não.	Oleodutos ou armazenamento em navios e posterior descarregamento nos terminais.	O óleo é exportado para navios petroleiros, que o descarregam nos terminais.	O óleo é exportado para navios petroleiros, que o descarregam nos terminais.	O óleo é escoado para uma plataforma de produção (FPSO), que realiza o processamento e o exporta através de navios.	Não.
Vantagem	A instalação é mais simples e permite que o controle dos poços seja feito na superfície.	A facilidade para mudar de locação e o comportamento de estrutura fixa, que permite que o controle dos poços seja feito na superfície.	Especialmente projetada para ter pouco movimento.	A capacidade de armazenamento permite que opere a grandes distâncias da costa, onde a construção de oleodutos é inviável.	Movimentos menores do que os FPSOs tipo Navio.	Possui sistema de ancoragem rígido e movimentos reduzidos, o que permite que o controle dos poços seja feito na superfície.	Maior autonomia para perfurar em grandes distâncias da costa.
Exemplos	Mexilhão, Pampo, Garoupa, Pargo 1A e 1B (geminadas).	P-3, P-4, P-5, P-6, P-59.	P-51 (prod.), P-56 (prod.), P-10 (perf.), P-55 (prod.), P-18 (prod.), P-25 (prod.), P-40 (prod.), P-52 (prod.).	P-34, P-50, P-54, P-62, Cidade de Angra dos Reis, Cidade de São Vicente, Cidade de Paraty, Cidade de Itajaí.	Plataforma de Piranema.	P-61.	NS-09, NS-15, NS-16, NS-24.

Fonte: Adaptado do site PETROBRAS.

2.5. FPSO

FPSO (sigla em inglês para *Floating, Production, Storage and Offloading*) é um navio-plataforma capaz de produzir, realizar o processamento primário de separação, armazenar

e transferir petróleo e gás. São navios de grande porte, podendo ter sido convertido de um petroleiro, tais como VLCCs (*Very Large Crude Carrier*) ou ULCCs (*Ultra Large Crude Carrier*), ou construídos a partir de cascos novos.

Os FPSOs recentemente construídas para operar nos campos de produção do Brasil, normalmente, possuem capacidade de produção de 150 a 180 mil bpd de petróleo, 6 milhões de m^3 de gás por dia e injeção de água entre 40 a 60 mil m^3 por dia. Tem capacidade de geração de energia elétrica de 100 MW e acomodações para 110 a 160 pessoas a bordo, a depender do tamanho das acomodações e do sistema de salvatagem. Armazenam cerca de 1,6 milhões de barris e tem peso líquido de aproximadamente 60 mil toneladas.

As FPSOs possuem características que oferecem diversas vantagens para sua utilização na produção *offshore*. Podemos citar:

- Capacidade de operar em águas profundas (até 1.400 metros) e ultra-profundas (de 1.500 a 3.000 metros), utilizando-se de um sistema de ancoragem em vez de estruturas fixas rígidas.
- Grande capacidade de armazenamento de óleo cru em seus tanques de carga, não havendo a necessidade de longos trechos de oleodutos para realizar o escoamento da produção. No entanto, periodicamente, deve ser realizado o descarregamento (*offloading*) da produção por meio de navios aliviadores.
- Flexibilidade de combinação com os demais sistemas como TLPs, Plataformas fixas, árvores de natal, podendo ser “molhada” ou “seca”, e manifolds, também “molhado” ou “seco”.
- Facilidade de realocação, ou seja, pode ser deslocada para atender outro reservatório, bastando apenas desconectar os *risers* e o sistema de ancoragem.
- Completação mecânica é realizada no estaleiro, não havendo a necessidade de *offshore deckmates*, ou seja, junção de estruturas (ex. jaquetas e plataforma).

Outra importante característica de uma FPSO está relacionada ao seu sistema de ancoragem. Há diversos tipos de sistemas de ancoragem que se dividem basicamente em dois principais tipos: *Single Point Mooring* e *Spread Mooring*.

O sistema de *Single Point Mooring* pode ser dividido em dois tipos: SPM com bóia ou estrutura fixa externa (normalmente para águas rasas) ou SPM com *Turret* (normalmente para águas profundas). O sistema de *Turret* consiste em uma torre integrada interna ou externamente à estrutura do casco da FPSO, permitindo que a unidade gire em torno do seu próprio eixo. Possui um sistema de mancais para possibilitar os movimentos de rotação (*swivels*), utilizando-se de fluidos e energia para realização dos movimentos constantes.

Em sua torre são acomodados, além das âncoras, os *risers* e umbilicais, sendo que toda a comunicação com o sistema submarino se faz através do *Turret*.

O sistema de *Spread Mooring* é largamente utilizado devido ao seu baixo custo, pois depende de componentes mecânicos mais simples e não há necessidade de fluidos, gás e energia para rotação de *swivels*. Esse sistema normalmente possui grupos de âncoras, distribuído em um padrão simétrico, localizadas na popa e na proa, o que impede a variação na orientação da FPSO. Além disso, os *risers* e umbilicais podem ser acomodados em amplo espaço nas laterais a bombordo ou a boreste da embarcação.

Devido às suas excelentes vantagens, podemos observar na Figura 2.7 o crescimento da utilização de FPSOs no mundo para produção de óleo e gás em águas profundas e ultra-profundas. Sua relevância tem possibilitado a indústria *offshore* avançar para águas ainda mais profundas. O FPSO se tornou um dos conceitos mais viáveis comercialmente para exploração e produção de óleo e gás em áreas remotas e/ou águas profundas [12].

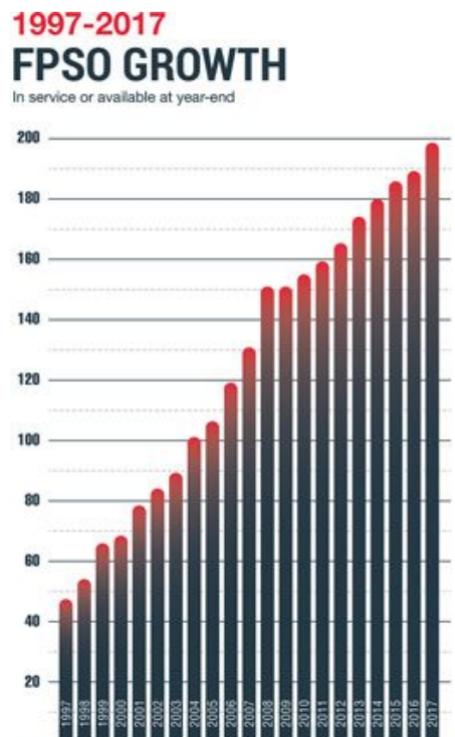


Figura 2.7: Crescimento na Utilização de FPSOs

Fonte: *Offshore Magazine*.

2.5.1. Planta de Processo (*Topside*)

Uma importante característica de um FPSO é a sua capacidade de processar o petróleo retirado dos reservatórios, separando o óleo, a água e o gás, além de outros sedimentos e contaminantes. O petróleo é elevado dos poços de produção até a superfície por meio de tubulações especiais chamadas de *risers*, construídas para resistir a imensas pressões exercidas pela coluna da água. Os *risers* chegam a plataforma e são conectados aos *ma-*

nifolds, conjunto de válvulas de controles necessários para proporcionar flexibilidade e segurança na operação da plataforma. No *manifold* também estão instalados os lançadores e os recebedores de *pigs*, responsáveis pela manutenção dos *risers* e dos equipamentos submarinos. O petróleo proveniente dos diversos poços de produção são alinhados aos dutos principais chamados de *headers*. Dessa forma, o petróleo é direcionado para os pré-aquecedores, onde recupera-se a energia despendida, incrementando-se a temperatura do petróleo. Aqui encontramos os trocadores de calor do tipo casco e tubo, onde água quente sob pressão, percorrerá estrutura interna do trocador constituída por vários dutos de pequeno diâmetro e o petróleo ocupará o casco que os envolve maximizando, assim, a troca de temperatura. Assim, o petróleo é aquecido a uma temperatura de 80°C , ideal para iniciar o processo de separação.

O separador de produção é um vaso atmosférico que realiza o primeiro estágio de separação do óleo, água e gás. Opera sob controle de algumas variáveis como pressão, temperatura, níveis de interfaces entre os fluidos. Esta fase garante a separação de um grande volume de óleo, água e gás e, a partir daí, esses fluidos passam a ser tratados individualmente nos sistemas subsequentes e enquadrados nos mais restritos padrão de qualidade requeridos.

Iniciando-se pelo óleo, este que segue para os tratadores eletrostáticos, equipamento que tem o objetivo de enquadrar o teor de BSW (água e sedimentos) e o teor de salinidade do óleo. Utiliza-se o campo elétrico como meio de desemulsão. O campo elétrico de corrente alternada provoca o alongamento das gotículas de água, criando uma força de atração entre as gotículas próximas, enfraquecendo a película de emulsificante, induzindo a coalescência e, posteriormente, a decantação das gotas de água. O óleo que sai dos tratadores eletrostáticos é resfriado em um trocador de calor do tipo placas paralelas, onde o fluido de resfriamento é a água do mar. Após o resfriamento, o óleo segue para o separador atmosférico, que é o último estágio de separação do óleo. Paralelamente, efetua-se a recuperação dos gases separados nesse vaso, maximizando a produção de gás. Finalmente, o óleo segue para os tanques de carga do navio, que deve ser distribuído de maneira equivalente pelos diversos tanques, visando manter a estabilidade da embarcação. Após cerca de alguns dias de produção, o óleo acumulado nos tanques da plataforma é aliviado através de bombeamento para um navio aliviador. Essa operação é denominada de *offloading* e pode ser realizada tanto pela proa quanto pela popa dos FPSOs.

A água oleosa proveniente do separador de produção trifásico, entra numa bateria de hidrociclones, onde parte do óleo associado a água é removido e devolvido para o sistema de tratamento de óleo. A água quase isenta de óleo passa, então, por um pré-aquecedor antes de entrar no flotador, que é o equipamento responsável pelo enquadramento final da água produzida. Após essas fases, a água é então armazenada em tanques estruturais da plataforma (*slop tank*), onde a depender do seu teor de óleo e água é reenviado para os hidrociclones e flotadores. Uma vez enquadrada no teor de óleo permitido, a água

produzida pode ser descartada para o mar.

Após sair dos separadores de produção, o gás ainda possui uma quantidade de líquido que precisa ser retirado antes de chegar ao compressor. Vasos chamados *safety* cumprem com papel de separar líquido do gás e minimizam a possibilidade de arraste de líquidos para os compressores, evitando danos aos compressores. Existem dois estágios de compressão, cada um é composto de um resfriador de gás e um vaso para separação do condensado. O gás proveniente do segundo estágio de compressão (após o resfriamento), segue para unidade de remoção de CO_2 e H_2S , que tem como função a remoção desses contaminantes do gás. Após essa fase, o gás segue para a unidade de desidratação, que tem como função retirar as partículas de água que ainda se encontram associadas ao gás. Ao sair desta unidade, o gás entra no terceiro e último estágio de compressão. O gás fica, assim, disponível para exportação através dos dutos submarinos até as unidades de processamento de gás *onshore*.

O processo de injeção de água nos poços injetores começa com a captação de água do mar por meio de bombas de elevação. A água do mar passa por filtros para remoção das partículas maiores e, depois, menores. A água do mar é, então, levada para unidade de remoção de sulfato, onde é retirada a salinidade da água através de membranas que agem como filtros de sal. Após essa etapa, a água proveniente é encaminhada para a torre desaeradora, onde é submetida a um *stripping* de gás, que é um processo de remoção mecânica do oxigênio. Paralelamente, é feita a injeção de um sequestrante de oxigênio e sulfito de sódio, com o objetivo de realizar a remoção química do oxigênio que não foi removida pelo *stripping*. Na saída da torre desaeradora são injetados produtos químicos biodispersantes que evitam depósitos de microorganismos e biocidas de choques para controle microbiológico. Todo o tratamento à base de produtos químicos e sistema de filtração tem como principal objetivo proteger da corrosão os materiais construídos em aço carbono e, conseqüentemente, minimizar o arraste de partículas para o reservatório. Essas medidas são necessárias para evitar a queda de injetividade nos poços e evitar a perda de produção devido as incrustações.

Podemos observar na Figura 2.8, um fluxograma simplificado do processamento primário de separação de óleo, gás e água. Esses processos podem variar de um FPSO para outra em alguns processos, a depender das características do petróleo do reservatório.

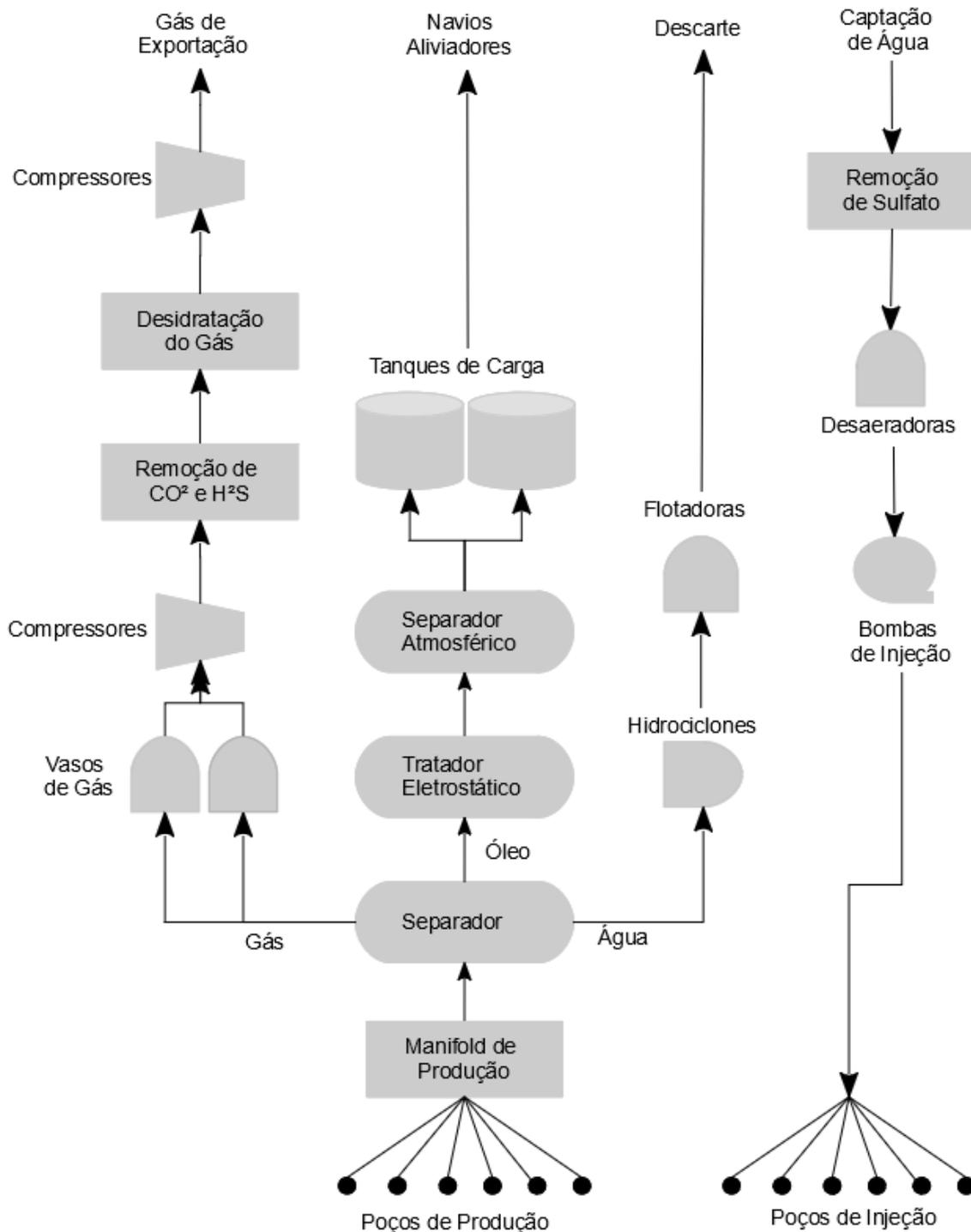


Figura 2.8: Fluxograma Simplificado da Planta de Processo de uma FPSO

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

2.5.2. Construção e Montagem

A construção e montagem (C&M) de um FPSO revela-se um projeto de grande desafio para os diversos campos da engenharia. Há uma quantidade elevada de materiais e equipamentos a serem supridos e processados. Para dificultar ainda mais a execução dessas

atividades, os processos de construção e montagem incluem a instalação de itens exclusivos em locais específicos, que devem coincidir antes que a instalação possa ocorrer [13]. Portanto, as atividades são interdependentes, ou seja, possuem relação de precedência entre elas, resultando em uma necessidade de gestão cada vez mais eficiente para minimizar os impactos em custo e prazo, como ociosidade, estoques, retrabalhos, etc.

A implementação de um FPSO evolui dentro das seguintes fases em sequência e relacionadas entre si: Projeto (Básico e Detalhado), Suprimento, Construção e Montagem, Comissionamento, Pré-Operação e Partida. Diante da alta competitividade nesta indústria, essas fases estão cada vez mais ocorrendo em paralelo, o que aumenta o risco e dificulta a gestão do projeto.

Atualmente, a estratégia na construção e montagem de um FPSO ocorre de forma modularizada, ou seja, blocos pré-montados como módulos, *pancakes*, *skids* que serão integrados à unidade principal assim que concluídos. A construção e montagem é então subdividida em disciplinas, também relacionadas entre si: Estrutura, Tubulação, Mecânica, Naval, Segurança, Elétrica, Instrumentação e Telecomunicações. Cada uma dessas disciplinas possuem atividades específicas, a saber:

- Estrutura: divide-se em fabricação (corte, ajuste, solda, inspeção), montagem (posicionamento, ajuste, solda, inspeção) e pintura.
- Tubulação: divide-se em fabricação (corte, bisel, ajuste, solda, inspeção), montagem (posicionamento, ajuste, solda, inspeção, teste hidrostático, lavagem, remontagem e inertização) e pintura.
- Mecânica: divide-se em fabricação (realizado por fornecedor de cada equipamento) e montagem (posicionamento, instalação, alinhamento e nivelamento, interligação).
- Naval: idem as atividades da disciplina de estrutura, porém interligadas à embarcação.
- Segurança: instalação de equipamentos, materiais e sinalizações de segurança.
- Elétrica: divide-se em fabricação e montagem de eletrocalhas e suportes, lançamento de cabos, conexão, instalação de equipamentos e acessórios.
- Instrumentação: divide-se em fabricação e montagem de eletrocalhas e suportes, lançamento de cabos, conexão, instalação de instrumentos, instalação de *tubing* e instalação de equipamentos e acessórios.
- Telecomunicações: idem as atividades de elétrica.

Em um FPSO, existem cerca de 80 sistemas que por sua vez são divididos em mais de 500 subsistemas, dos quais, podemos citar alguns: processamento de óleo, gás e água,

geração de energia principal, auxiliar e emergencial, segurança e controle, lastro da embarcação, ancoragem, içamento e movimentação de cargas, geração de gás inerte, geração de nitrogênio, ar comprimido, acomodações, esgoto, monitoramento de nível nos tanques, captação de água do mar, injeção química, posicionamento, *offloading* e medição fiscal, entre muitos outros.

Podemos verificar que existe uma rede de precedência entre os sistemas. Como exemplo, para operar um turbogerador (geração principal) é necessário que o sistema de lubrificação, sistema de captação da água do mar, sistema de alimentação de diesel e gás, painel de alta voltagem estejam operando normalmente.

↳ TUBULAÇÃO:

A tubulação talvez seja a disciplina de maior relevância na construção e montagem de uma FPSO. Devido ao volume de materiais a serem processados (aproximadamente 30 mil toneladas de aço), a densidade de tubos em pequenos espaços (característico em plataformas *offshore*), a dificuldade de acessibilidade a determinadas posições na montagem, os diferentes tipos de aços e especificações colocam essa disciplina com características de alta complexidade.

Os aços dos tubos utilizados em uma plataforma dependem das características do óleo, gás e água produzidos e dos sistemas auxiliares. Em geral são utilizados aço carbono e aços especiais (cobre-níquel (CN) , aço inoxidável (AI) , duplex (DP) , superduplex (SD) , etc), além de outros materiais como fibra de vidro (*Fiber Reinforced Polymer - FRP*) e tubos PVC (Policloreto de Vinila) .

As atividades de fabricação e montagem de tubulação seguem os fluxos de processo descrito na Figura 2.9. A depender do tipo de aço que está sendo usado, de sua espessura, diâmetro e peso tornam cada atividade mais ou menos difícil de ser executada.

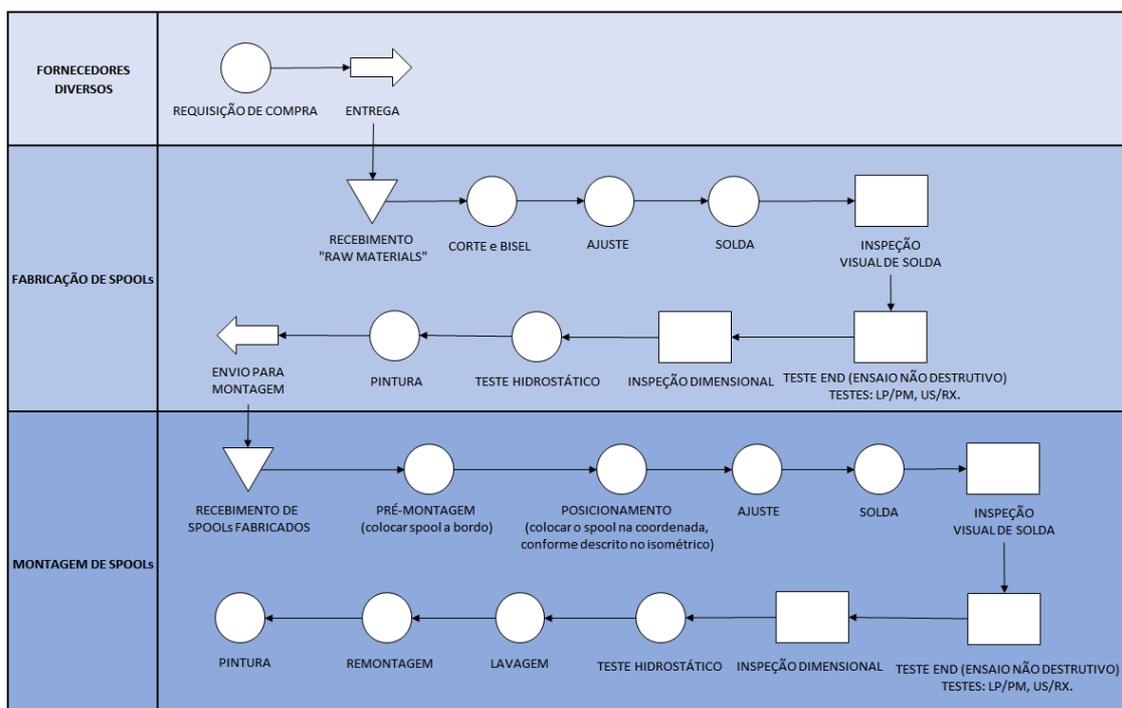


Figura 2.9: Fluxograma do processo de fabricação e montagem de tubulações

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Em um projeto de tubulação de um FPSO, existem diversos tipos e especificações de materiais que são utilizados. Podemos observar na Tabela 2.4, a quantidade de diferentes especificações que possui um arranjo de tubulação em um FPSO típica.

Tabela 2.4: Tipos de Materiais

MATERIAL	TIPOS DISTINTOS	QTDE TOTAL	UNIDADE
BOLT	315	121.352	unidade
FITTING	1.327	37.357	unidade
FLANGE	477	20.842	unidade
GASKET	202	16.580	unidade
MISCELL	1.240	3.773	unidade
PIPE	220	59.334	metro
VALVE	557	5.386	unidade

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A importância das tubulações em um FPSO é enorme. Ela é essencial para o funcionamento dessa pequena indústria de processo, pois são elementos físicos de ligação entre os diversos equipamentos por onde circulam os fluidos. O valor das tubulações representa, em média, 20 a 25% do custo total da instalação, 45 a 50% no custo total da montagem e 20% no custo total do projeto [14].

2.6. Complexidade

2.6.1. Definição

Na literatura é difícil encontrar uma definição formal de complexidade. Em termos simples, complexidade é percebido como algo que contém muitas partes em arranjos complicados [15]. Vale ressaltar que cada área da ciência pode ter uma interpretação distinta sobre o conceito de complexidade, que deve ser adaptado a sua realidade. Além disso, é um conceito que pode evoluir com o tempo, a depender da evolução da ciência.

Um projeto de engenharia pode ser considerado um processo complexo? Devido à ampla variedade de processos e materiais, na grande relação de dependência entre as atividades e na hierarquia que existe, podemos inferir que a construção e montagem de um projeto de engenharia possui uma arquitetura de complexidade. [4] vêem a complexidade como a interdependências entre o produto, processo e tecnologias. Colocam como hipótese que a novidade tecnológica e as características de complexidade do projeto contribuem para incerteza da tarefa e, por sua vez, estão associadas com os resultados da execução do projeto. [16] definiu a complexidade do projeto e identificou os fatores que influenciam como recursos empregados, meio ambiente, nível de conhecimento científico e tecnológico requerido, e número de diferentes partes no fluxo de trabalho. [17] propõe uma metodologia para explorar e avaliar totalmente a complexidade do projeto identificando os indicadores de complexidade usados para descrever e medir a complexidade do projeto. Portanto, podemos inferir que a construção e montagem de uma FPSO é uma um projeto complexo, porque temos um grande volume de componentes heterogêneos, dimensões e pesos em grande escala, sequência de montagem hierarquizada, etc.

A medida que o conceito evolui, a complexidade ganha novos conceitos. [7] revelam que:

complexidade implica em tempo, qualidade, custo, desempenho, etc. Vários fatores que influenciam a complexidade do produto foram identificados como número de componentes, número de interações/conexões, número de operações de montagem, número de sub-montagens, tamanho da hierarquia, número de níveis de precedência na hierarquia, tipo de interações/conexões, propriedades das interações, conexões, tipo de componentes, geometria, forma, material, processo de produção, tamanho, densidade, acessibilidade, peso, etc.

[18] definem a complexidade como um sistema com numerosos componentes e interconexões, interações ou interdependências que são difíceis de descrever, entender, prever, gerenciar, projetar e mudar.

Atualmente, podemos perceber que a complexidade está inserida nos sistemas e tecnologias. Descobrir uma forma eficiente de medir a complexidade, passou a ser de grande interesse da área de engenharia, uma vez que a complexidade permite identificar inefici-

ências em *design* e processos. Complexidade é visto como um desafio central para as empresas de montagem. Complexidade não é um estudo simples e não vai desaparecer em o futuro próximo. A gestão da complexidade deve, assim, tornar-se uma habilidade essencial dos principais executivos e gerentes [19].

2.6.2. Estudos Relacionados

[20] apresenta a complexidade de *design* dividido em três categorias: geometria, topologia e montagem.

- Geometria: rede de polígonos definidos em termos de sua geometria (valores coordenados de vértices que representam o modelo) e conectividade do objeto (relação entre os vértices que definem as faces do polígono). Assim, esta rede representa a complexidade de forma (*shape complexity*).
- Topologia: classificação das formas, em que partes similares são identificadas e agrupadas com o propósito de gerar planos de fabricação e cronograma de produção. As propriedades de agrupamento consideram número de faces no modelo, número de lados de um polígono, curvatura, simetria, densidade, variabilidade angular, etc
- Montagem: otimizar a sequência de montagem considerando aqueles geometricamente exequíveis. Complexidade de sequência pode ser definida em termos de número de inserções, reorientações, número total de operações e profundidade da estrutura do produto (hierarquia).

Importante salientar que reduzir a complexidade de um produto reduzindo o número de partes, um outro fator deve ser considerado. A redução de partes em um produto pode gerar partes com características mais complexas, o que pode exigir processos mais complexos. Esse *trade-off* entre o número de partes e complexidade de montagem pode ser observado na Figura 2.10 e o equilíbrio deve ser atingido para minimizar custos e prazos de produção.

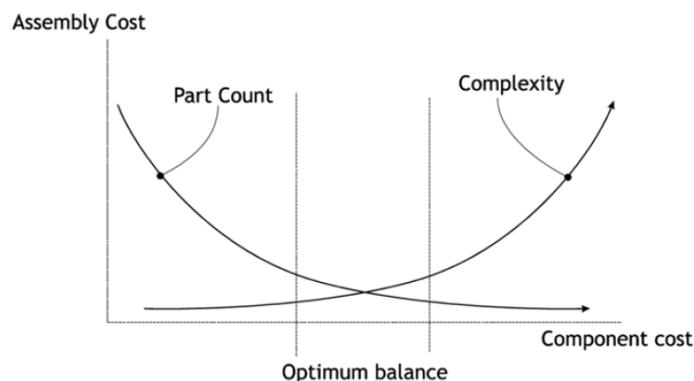


Figura 2.10: Influência da complexidade de componentes e partes no custo.

Muitos pesquisadores têm tentado medir a complexidade de montagem. [21] propõem um método de *Design for Assembly* (DFA) baseado em modelo de dificuldade de montagem com dados extraídos de um grande número de observações empíricas de pessoas e máquinas. [22] apresentam um índice de dificuldade para quantificar a agilidade e o tempo requerido para a montagem de um produto, porém não inclui os efeitos de geometria das partes no cálculo. [23] relacionam a complexidade de montagem com o tempo requerido para executar a montagem, introduzindo a complexidade do tempo como uma função linear das informações para estimar o tempo total de montagem. [20] apresentaram a complexidade em dois níveis: complexidade de componente (associado aos aspectos de *design* relacionado diretamente a cada componente) e complexidade de montagem (complexidade intrínseca do produto). Posteriormente, a complexidade de componente é dividida em complexidade de fabricação (geometria) e processo (manuseio e inserção). Enquanto a complexidade de montagem está dividida em complexidade estrutural (interfaces e interações) e sequência de montagem.

Em termos de processos de fabricação, custos de montagem custos e qualidade do produto final, complexidade desempenha um papel importante na obtenção do melhor *design* de produto, considerando o planejamento de montagem e a seleção do processo de fabricação mais adequado [24].

Sistemas de manufatura são um dos mais complexos processos. Portanto, analisar a complexidade da cadeia de processo de manufatura auxilia no entendimento e controle do sistema. Neste contexto, [25, 26] revelam que medir a complexidade permite que gerentes identifiquem os problemas no sistema que estão obstruindo o fluxo de produção. [27] entende que a complexidade nas atividades logísticas tem como consequência um alto custo operacional, insatisfação do cliente, atrasos na entrega, estoque elevado ou insuficiente.

Um dos métodos mais aceito pela comunidade científica está relacionada a Teoria da Entropia, estudada por [28]. Entropia é uma grandeza termodinâmica que mensura o grau de irreversibilidade de um sistema, encontrando-se geralmente associada ao que se denomina por “desordem” de um sistema termodinâmico. [29], em seu estudo, confirma que complexidade de manufatura pode ser entendida em termos de variabilidade, desordem, incerteza ou entropia e propõe medir a complexidade por estágio do *design* do produto. [30] propõem um modelo de entropia dinâmica dividida em complexidade estrutural e operacional. [31] propõem a medição da complexidade baseado na entropia da informação para o planejamento da montagem. [32] aplicaram uma função de entropia para quantificar a complexidade do processo de manufatura e suas configurações com exemplos em processos com máquinas. [33] desenvolveram um conjunto de indicadores de complexidade para comparar alternativas de *layout* nos estágios iniciais de *design*. [34] revelam que incertezas na demanda geram problemas de planejamento e controle.

Acredita-se que a complexidade seja uma das as principais causas dos atuais desafios

nos sistemas de fabricação e montagem como processos de *design* longos e caros, maior custo no ciclo de vida e a existência de numerosos modos de falha. Sistemas de montagem complexos são caros para implementar, executar, controlar e manter [35].

Conforme [36], o processo de montagem afeta muito a qualidade e custo final do produto. O processo de montagem responde por mais de 50% do tempo e 20% do custo total de produção. Projetar componentes individuais pensando na facilidade de montagem pode reduzir os custos e tempo significativamente, em consequência, materiais e recursos humanos são minimizados [37].

A complexidade de um sistema físico pode ser caracterizado em termos de sua estrutura estática e dinâmica. Complexidade Estática refere-se às características inerentes do sistema e das relações entre seus elementos, com a variedade de componente e interações entre eles. Complexidade Dinâmica refere-se às características de operação do sistema e às imprevisibilidades de seu comportamento durante um determinado período [24, 38, 39].

Abordagens heurísticas para medir a complexidade também são passíveis de utilização, porém utilizam métricas baseadas em experiências pessoais. São de fácil aplicabilidade, coleta de dados, interpretação e, eventualmente, podem melhorar os sistemas. Não obstante, são frequentemente criticados por ser uma abordagem subjetiva e, sendo assim, a métrica pode encontrar dificuldades em refletir realmente a complexidade do sistema.

Apesar da falta de uma definição formal de complexidade, aceita-se que os sistemas modernos de engenharia estão se tornando cada vez mais complexos, sistemas grandes têm complexidade relativamente alta e sistemas modulares têm menor complexidade [40]. O crescimento da complexidade nos sistemas apresentam dificuldades no gerenciamento e na operação, afetando a qualidade e produtividade, por isso, é de fundamental importância o estudo e a medição da complexidade.

2.6.3. Métricas para Medir a Complexidade

[7] elaboraram um método que explora as relações entre os fatores de complexidade. Em seu estudo, os autores propõem que a complexidade seja medida através de três fatores, que juntos, formam a complexidade total: complexidade de forma, complexidade de montagem e complexidade de material.

➤ Complexidade de Forma: refere-se à capacidade de realizar a fabricação individualizada de partes do produto. É uma quantidade numérica do grau que cada forma é compactada. Podemos obter pelas equações (2.1) e (2.2):

$$C_{sh} = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - \psi)}{n} \quad (2.1)$$

$$\psi = \frac{A_s}{A} = \frac{\pi^{1/3}(6V)^{2/3}}{A} \quad (2.2)$$

onde,

- C_{sh} é a complexidade de forma;
- ψ é a esfericidade;
- n é o número de partes para montagem;
- A é a área lateral do sólido;
- A_s é a área lateral da esfera;
- V é o volume do sólido.

➤ Complexidade de Montagem: refere-se à capacidade de montar os componentes do produto. Mede o nível de diversidade e interconectividade entre as partes. Este índice afere a complexidade da hierarquia contida no produto, descrevendo o produto em árvores, com itens e sub-itens. Assim, a complexidade de montagem pode ser resumida pela equação (2.3):

$$C_{as} = C \left[\bigcup_{i=1}^n T_i \right] = \sum_{i=1}^n C(T_i) + N_T \log_2(2^{k_T} - 1) \quad (2.3)$$

onde,

- $C_{as} = C \left[\bigcup_{i=1}^n T_i \right]$ é a complexidade de montagem de uma floresta composta de n árvores não-isomórficas;
- $\sum_{i=1}^n C(T_i)$ é a complexidade de n sub-árvores não-isomórficas;
- N_T é o número de elementos no nível inferior da árvore;
- k_T é a número de ramos não-isomórficos;

➤ Complexidade de Material: refere-se ao uso de diferentes tipos de material aplicado em um produto. Sua medição pode variar de acordo com o material que está sendo considerado. Um exemplo pode ser observado na equação (2.4):

$$C_{mt} = C_{pt} + C_{st} \quad (2.4)$$

onde,

- C_{pt} é número de diferentes combinações entre espessura de chapa e tipo de material
- C_{st} é número de diferente combinações entre tipos de perfis de viga e tipo de material;

Assim, o modelo pode ser dado pela equação (2.5), C_T representa a complexidade total e w_1, \dots, w_i representam suas respectivas ponderações:

$$C_T = \frac{w_1 C_{sh} + w_2 C_{as} + w_3 C_{mt}}{w_1 + w_2 + w_3} \quad (2.5)$$

[1] propõem que a complexidade de montagem do produto seja definida como o grau em que cada parte / sub-montagem tem seus atributos geométricos / físicos que causam dificuldades ou problemas durante os processos de manipulação e inserção na montagem manual e automática. O procedimento para medir a complexidade está representado na Figura 2.11, baseado em índices de manuseio e inserção até chegar no índice de complexidade do produto.

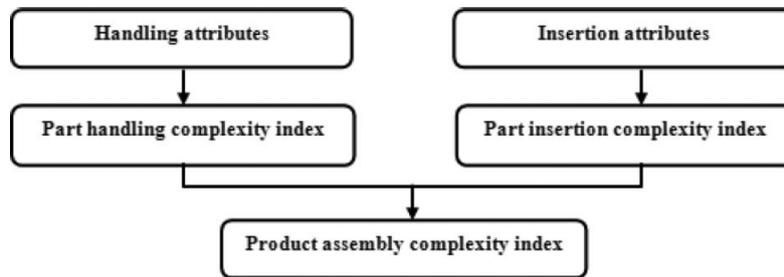


Figura 2.11: Índice de complexidade do produto, segundo [1].

Podemos, então, calcular os indicadores como:

➤ Complexidade média de manuseio:

$$C_h = \frac{\sum_1^J C_{h,f}}{J} \quad (2.6)$$

onde,

$C_{h,f}$ é o fator relativo de complexidade de manuseio

J é o número de critérios de manuseio para cada parte

➤ Complexidade média de inserção:

$$C_i = \frac{\sum_1^K C_{i,f}}{K} \quad (2.7)$$

onde,

$C_{i,f}$ é o fator de complexidade médio por inserção

J é o número de critérios de inserção para cada parte

➤ Cálculo da complexidade de montagem de cada parte por média ponderada:

$$C_{part} = \frac{C_h \sum_1^J C_{h,f} + C_i \sum_1^K C_{i,f}}{\sum_1^J C_{h,f} + \sum_1^K C_{i,f}} \quad (2.8)$$

➤ Cálculo da complexidade do produto:

$$CI_{product} = \sum_{p=1}^n x_p C_{part} \quad (2.9)$$

onde,

x_p é o percentual de partes não-similares
 n é o número de partes únicas

Assim, a complexidade da montagem do produto pode ser obtida:

$$C_{product} = \left[\frac{n_p}{N_p} + CI_{product} \right] [\log_2(N_p + 1)] + \left[\frac{n_s}{N_s} \right] [\log_2(N_s + 1)] \quad (2.10)$$

onde,

$C_{product}$ é a complexidade de montagem do produto
 N_p e N_s são os números de partes e fixadores, respectivamente
 n_p e n_s são os números de partes e fixadores únicos, respectivamente
 $CI_{product}$ é o índice de complexidade do produto

Na montagem da cadeia de suprimentos, o principal objetivo é atingir a coordenação ideal entre fornecedores e fabricantes. Um dos maiores desafios no início estágio de projeto é tomar uma decisão sobre a estrutura de fabricação inserida em uma rede adequada que irá satisfazer os requisitos funcionais de produção e tornará as tarefas gerenciais mais simples e eficaz, sendo que qualquer redução de redundância da complexidade é considerada uma forma de aumentar o desempenho organizacional e reduzir as ineficiências.

Nesse contexto, [41] propõem um método para medir a complexidade na estrutura da cadeia de suprimentos em que cada nó da cadeia tem no máximo um sucessor, com quantidades indefinidas de predecessores. A entropia da informação de um grafo com o total de pesos W e o peso do vértice w_i pode ser expresso pela equação 2.11:

$$H(W) = W \log_2 W - \sum_{i=1}^V w_i \log_2 w_i \quad (2.11)$$

substituindo $W = \sum deg(v)_i$ e $w_i = deg(v)_i$, temos a medida de complexidade estrutural pode ser observada pelo índice do grau do vértice I_{vd} :

$$I_{vd} = \sum_{i=1}^V deg(v)_i \log_2 deg(v)_i \quad (2.12)$$

[42] continuam sua metodologia utilizando a teoria dos grafos para estimar as propriedades do processo de manufatura. Na teoria dos grafos, o grafo $G = (V; E)$ consiste

em um conjunto de vértices $V(G)$ e arestas $E(G)$, sendo que dois pontos conectados por uma linha são considerados *adjacentes* e duas linhas que compartilham o mesmo ponto final são chamadas de *incidentes*.

Os autores então propõem uma descrição do sistema de manufatura a partir de diversos indicadores de complexidade, a saber:

- Estimador de Restritividade (*Restrictiveness Estimator - RT*): mede a força da ordem.

$$RT = \frac{2 \sum r_{ij} - 6(N - 1)}{(N - 2)(N - 3)} \quad (2.13)$$

onde r_{ij} é o elemento de *alcancibilidade*, ou seja, $r_{ij} = 1$ se há uma ligação entre os vértices v_i e v_j , $r_{ij} = 0$ caso contrário.

- Indicador de Complexidade Agregada (*Aggregate Complexity Indicator - AC*): agrega três indicadores como ligação da estrutura B , diversidade da estrutura SD e diâmetro da rede D .

$$AC = \lg \left(B + SD + \frac{D}{3} \right) \quad (2.14)$$

onde,

$$B = \frac{L}{N - 1} - 1 \quad (2.15)$$

$$SD = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} c_{ij} - 1 \quad (2.16)$$

$$D = \max_{ij} (D_{ij}) \quad (2.17)$$

N_1, N_2 são números iniciais e finais dos nós

c_{ij} representa o número de caminhos heterogêneos do nó i para o nó j

D_{ij} é o caminho mais curto entre i e j

- Menor Comprimento Médio (*Average shortest length - ASP*): mede a distância da rede entre cada par de nós.

$$ASP = \frac{1}{N(N - 1)} \sum \sum d_{ij} \quad (2.18)$$

onde d_{ij} é o caminho mais curto entre o nó i para o nó j .

- Número de Árvores (*Number of Trees - T*): calculado usando o determinante D_i de geração de árvore, definido pelo o número de saídas da cada nó da estrutura.

$$T = \sum D_i \quad (2.19)$$

- Grau de Complexidade (*Complexity Degree - κ*): calcula a interrelação entre os elementos dentro da estrutura.

$$\kappa = \frac{\sum_{i=1}^m m_i}{m} \quad (2.20)$$

- Complexidade de Fluxo (*Flow Complexity - FC*): conta todas as ligações da estrutura, ponderados por coeficientes arbitrados α , β e γ .

$$FC = \alpha \sum_{i=1}^n T_i + \beta \sum_{s=1}^m N_s + \gamma \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k LK_{ij} \quad (2.21)$$

onde T_i é a ligação, N_s é o nó, LK é a ligação entre i e j .

- Complexidade de Fluxo Modificado (*Modified Flow Complexity - MFC*): combina o FC junto com o MTR e MTI .

$$MFC = \alpha T + \beta N + \gamma L \quad (2.22)$$

onde,

$$\alpha = MTI = \frac{TN - N}{(T - 1)N} \quad (2.23)$$

$$\beta = MTR = \frac{TN}{N} \quad (2.24)$$

$$\gamma = MLR = \frac{LK}{L} \quad (2.25)$$

- Índice de Grau do Vértice (*Vertex Degree Index - I_{vd}*): como visto anteriormente, mede a entropia de informação do grafo, representadas nas equações 2.11 e 2.12.
- Índice de Ligação (*Link Tiers Index - LTI*): estrutura com menor número de ligações é topologicamente menos complexa.

$$LTI = \sum_{j=1}^p \sum_{l=1}^m l_j t_l \quad (2.26)$$

Para a medição da complexidade estática, [43] propõem identificar as diferenças entre as métricas existentes e compará-las, a saber:

- Métrica de [44]: desenvolveram três métricas para medir a complexidade estática que difere de acordo com o número de variáveis de entrada, como por exemplo, o número de máquinas r , número de operações m e número de partes n .

$$H_s = \log m^2 n r \quad (2.27)$$

- Métrica de [45]: adotam o conceito de entropia da informação apresentado por [28]. O princípio deste método é baseado no relacionamento entre produtos e máquinas de acordo com o cronograma planejado.

$$H_s = - \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^S p_{ij} \log_2 p_{ij} \quad (2.28)$$

onde M representa o número de máquinas, S é o número de possíveis planos da máquina j , p_{ij} é a probabilidade que a máquina j esteja no estado i .

- Métrica de [46]: também adota o conceito de entropia da informação apresentado por [28]. Assume que as probabilidades de qualquer máquina j estar em qualquer estado i são aqueles que refletem o número de operações na máquina disponível.

$$H_s = - \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^S p_{ij} \log_2 p_{ij} \quad (2.29)$$

onde M representa o número de máquinas, S é o número de possíveis planos da máquina j , p_{ij} é a probabilidade que qualquer máquina j esteja em qualquer estado i .

- Métrica de [43]: adotam o método de [28], alterando o significado das probabilidades de estado da máquina.

$$H_s = - \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^P p_{jk} \log_2 p_{jk} \quad (2.30)$$

onde,

p_{jk} é a probabilidade de que a parte
 k esteja sendo processada na máquina j
de acordo com a ordem planejada
 P representa o número de partes produzido
na cadeia de processo de manufatura
 M é o número de todas as máquinas de todos os tipos

Capítulo 3

MÉTODO

3.1. Caracterização do Estudo

O presente estudo busca verificar a relação existente entre a duração das atividades de construção e montagem de uma FPSO com sua complexidade de projeto. Projetos de FPSO nem sempre compartilham das mesmas especificações, características, sistemas operacionais, etc. Analisar as dificuldades de cada projeto torna-se relevante para medir sua complexidade de implementação, além de avaliar os custos e prazos estimados.

Para medir a complexidade da construção e montagem de um FPSO, busca-se explorar os modelos e métricas apresentadas até aqui, podendo, em alguns casos, ser incluído novas métricas para medição da complexidade, de forma a refletir a complexidade da fabricação e montagem com maior eficiência.

Atualmente, o planejamento das durações das atividades de fabricação e montagem são estabelecidas através da medida de peso do componente, multiplicado por índices de produtividade medidos a partir de outros projetos de FPSO que, como dito anteriormente, não compartilham das mesmas dificuldades. Com isso, pode-se aferir a duração de uma atividade a partir dos recursos disponíveis.

Neste estudo, pretende-se reavaliar esta abordagem com a iniciativa de verificar a relação entre duração das atividades com os índices de complexidade aferidos. Assim, o planejamento passa a ser elaborado de forma individualizada, respeitando as particularidades inerentes a cada projeto de construção e montagem de uma FPSO.

3.2. Limitações do Estudo

Este estudo utilizará os dados de projeto detalhado e de execução de fabricação e montagem realizado em um projeto de um FPSO construída em estaleiro do Brasil. Devido ao tamanho, quantidade, variabilidade, relacionamento das atividades em um projeto de uma FPSO, limitaremos este estudo na disciplina de tubulação.

Além disso, este estudo apresenta algumas limitações e dificuldades que serão apresentadas a seguir:

- Necessidade de acesso aos dados do projeto em razão do caráter confidencial de algumas informações, especialmente no que tange a assuntos estratégicos, antecipa-se possíveis dificuldades para acessar alguns documentos e/ou utilizá-los como referencial para o estudo.
- Dificuldade de generalização dos resultados obtidos: essa dificuldade é inerente aos estudos de caso únicos. Dessa forma, o estudo proposto neste trabalho tratará de generalizar um conjunto particular de resultados, a fim de desenvolver um modelo abrangente, sem se ater sobre a representatividade dos resultados obtidos em relação a outros projetos em geral.
- Limitação dos dados obtidos com especialistas em caso seja necessário utilizar uma métrica empírica: as informações obtidas são limitadas pelas percepções de profissionais experientes e por sua disposição em fornecer as informações que consideram relevantes.

Apesar de inevitáveis limitações, o estudo a ser desenvolvido buscará encontrar os índices de complexidade que determinam a dificuldade do projeto. Com isso, a equipe de projeto terá uma ferramenta que os auxiliará na compreensão do projeto no qual estão inseridos, como a complexidade de fabricação e montagem das linhas de tubulação, o que permite a análise detalhada do desempenho e performance a partir dos recursos mobilizados para realização das atividades. Com isso, busca-se a melhoria no processo de estimativa de durações das atividades e um planejamento mais eficiente, minimizando os riscos de projeto.

Capítulo 4

DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE ANÁLISE DE COMPLEXIDADE

4.1. Processo de Fabricação e Montagem de Tubulação

Conforme discutido anteriormente na seção 2.5.2, o processo de fabricação e montagem da disciplina de tubulação em uma FPSO ocorre a partir de uma série de atividades, que tem como objetivo transformar o material "cru" (*raw material*) em sistemas e arranjos complexos de ligações entre tubos e equipamentos para que fluidos possam percorrer a planta de processo com segurança e eficiência.

De maneira simples, podemos resumir o processo básico de criação de um sistema de tubulação na aquisição de tubos e conexões, cortar, juntar, soldar e testar as peças no *pipe-shop* transformando-os em *spools*, enviá-los para campo e montá-los (figura 4.1). No entanto, a implementação deste sistema em projeto de grande porte como uma FPSO revela-se muito desafiador.



Figura 4.1: Criação do Sistema de Tubulação

A complexidade do projeto aumenta devido aos diferentes padrões de engenharia, padrões de garantia da qualidade, restrições no cronograma do projeto, necessidades de prioridade e sequenciamento.

Assim, devemos separar o processo de criação do sistema de tubulação em cinco fases, conforme veremos a seguir.

4.1.1. Engenharia

Esta fase corresponde ao projeto de detalhamento (ou executivo) do projeto básico da FPSO. Aqui, os projetistas vão elaborar documentos de engenharia que servirão de insumo para as quatro fases subsequentes: aquisição de materiais, fabricação, montagem e comissionamento.

Normalmente ao realizar este detalhamento, os projetistas seguem a hierarquia dos sistemas que compõe aquela unidade e seu encaminhamento mecânico (geometria física) ao longo da unidade, podendo ser representada conforme figura 4.2.

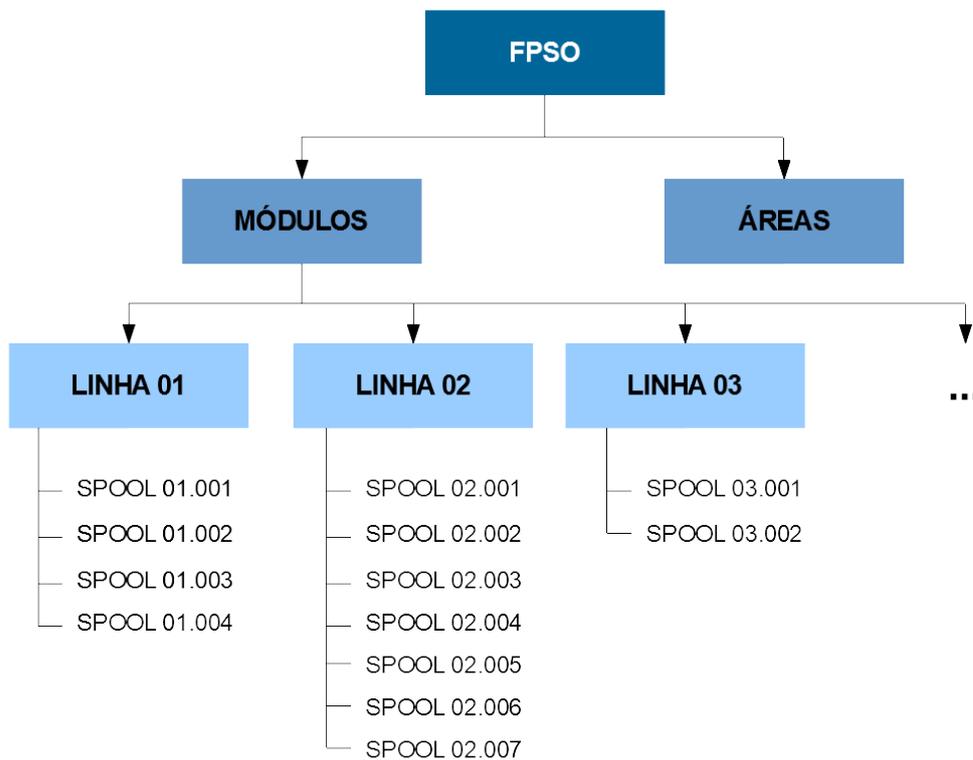


Figura 4.2: Hierarquia da Tubulação

Destaca-se nesta figura a hierarquia da “LINHA”, que corresponde a um trecho de tubulação com especificidades e características individuais dentro de um sistema do processo. Cabe ressaltar que toda linha tem uma identificação própria (*tag* único e exclusivo) e algumas linhas podem transcender os limites dos módulos.

Esses trechos de tubulação são gerados a partir dos desenhos isométricos. Os isométricos são documentos do projeto de detalhamento que apresentam várias informações importantes como os materiais a serem utilizados, peso, geometria, pontos de solda, localização em relação à unidade, etc. Normalmente, os isométricos são divididos por linha, ou seja, cada linha terá seu isométrico correspondente. A figura 4.3 apresenta um exemplo de isométrico, contendo diversas informações conforme destacado anteriormente.

tam uma quantidade elevada de tipos distintos, ou seja, com características e desenhos diferentes de materiais. Eles se dividem em tubos, flanges (pescoço, sobresposto, cego, encaixe, roscado), conexões (curvas de 45°, curva de 90°, tê, redução concêntrica, redução excêntrica, cruzeta, tampão, sela, colar, luva, união, etc), estojos (parafusos e porcas), juntas (papelaço, metálicas) e itens especiais. A figura 4.4 mostra alguns exemplos de materiais que são adquiridos em um projeto de tubulação de uma FPSO.



Figura 4.4: Tipos de Materiais de Tubulação

Vale ressaltar que neste tipo de projeto os materiais são adquiridos da indústria siderúrgica ou de usinagem, que fornecem os materiais (*raw materials*) já laminados e dentro das características comerciais previstas nas normas técnicas.

Nas unidades do tipo FPSO, é possível encontrar uma variedade grande de aços, que normalmente são divididas em aço carbono e aço especial.

O aço carbono é o material mais abrangente na disciplina de tubulação de um FPSO. É uma liga metálica e sua constituição de liga confere ao aço o seu nível de resistência mecânica, dispondo de 0,008% a 2,11% de concentração de carbono em sua composição. Em alguns casos, os tubos de aço carbono podem ser revestido internamente com polietileno e aço inoxidável, que conferem ao tubo a soma de propriedades como resistência mecânica e proteção à corrosão interna (a depender do tipo de fluido em seu fluxo interno), além de outros benefícios como redução de custo e redução de trabalho em aços especiais.

Os aços especiais, por sua vez, compreendem os aços inoxidáveis, duplex, superduplex, cobre-níquel e aço-liga especial. Além de conferir excelente resistência mecânica,

esses aços possuem propriedades importantes como alta resistência à corrosão e pressão, resistência à alta e baixa temperatura, durabilidade, baixa taxa de expansão térmica, entre outras.

Em menor quantidade, podemos verificar a utilização de outros materiais como linhas de PVC (*Polyvinyl Chloride*) e FRP (*Fiberglass Reinforced Plastic*) que, apesar de menor resistência mecânica, conferem benefícios como resistência à corrosão, resistência ao tempo e clima, durabilidade, além de redução de custos e menor prazo de entrega.

Na tabela 4.1, podemos observar algumas características dos principais tipos de aços (levando-se em consideração à especificação de maior frequência para cada tipo) que encontramos em uma FPSO.

Tabela 4.1: Características dos Tipos de Aços

Tipo	Especificação	Composição Química	Atributos	Aplicação
Aço Carbono	ASME B36.10, API 5L Gr.B PSL1	C 0.26 max Mn 1.2 max P 0.03 max S 0.03 max	Alta resistência mecânica, custo relativamente baixo e durabilidade	Sistemas de dreno aberto, flare, gás combustível, tratamento de gás, óleo lubrificante, processamento de óleo e gás, ar comprimido, diesel, etc
Aço Inoxidável	ASME B36.19 / B36.10, ASTM A358 Gr. 316L	C 0.035 max Mn 2.0 max P 0.045 max S 0.030 max Si 1.0 max Cr 16.0-18.0 Ni 10.0-14.0 Mo 2.0-3.0	Resistência a altas temperaturas e à corrosão química	Sistemas de processamento de óleo e gás, processamento de óleo e gás corrosivos, tratamento de gás, flare, gás combustível, injeção química, fluido hidráulico, ar de instrumentação, vent, água destilada e potável
Duplex	UNS S31803, ASTM A790	C 0.30 max Cr 21.0-23.0 Mn 2.00 max Mo 2.50-3.50 N 0.08-0.20 Ni 4.50-6.50 P 0.030 max S 0.020 max Si 1.00 max	Excelente resistência à corrosão da água do mar e a altas temperaturas	Sistemas de processamento de óleo e gás corrosivos
Super-Duplex	UNS S32760, ASME B36.19 / B36.10, ASTM A790	C 0.030 max P 0.030 max Mn 1.0 max N 0.20-0.30 S 0.010 max Si 1.0 max CR 24-26 Ni 6-8 Mo 3-4 Cu 0.50-1.0 W 0.50-1.0	Excelente resistência mecânica e alta pressão, resistência à processo corrosivos e água do mar	Sistemas de água do mar
Cobre-Níquel	UNS C7060X, EEMUA 144 90/10, 145 90/10, 14 90/1	Cu rem. Pb .01 max Fe 1.5-2.0 Zn 0.2 max P 0.2 max S 0.2 max Ni 10-11 Mn 0.5-1.0	Liga de cobre-níquel-ferro com um pequeno teor de manganês que permite excelente resistência à corrosão de água do mar, água salgada, compostos orgânicos, sais, ácidos não oxidantes diluídos, etc.	Sistemas de combate à incêndio (espuma e água do mar)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.1.3. Fabricação

O processo de fabricação da disciplina de tubulação tem como objetivo unir os materiais (*raw materials*) em trechos de tubulação que permitam sua montagem em campo. Os

trechos a serem fabricados deverão ser especificados conforme os documentos derivados do processo de “spoolagem”, desenvolvida na fase de engenharia.

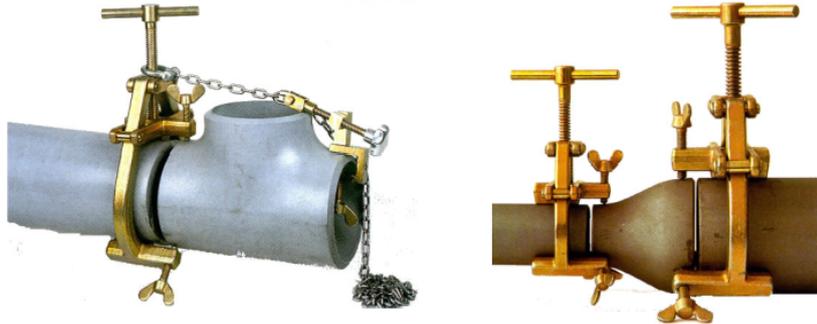
Para união desses materiais, diversas atividades devem acontecer para viabilizar essa fase: atividade de corte e bisel, ajuste, soldagem, testes, pintura, preservação e armazenamento para envio ao site de montagem. Essas atividades normalmente são realizadas em fábricas denominadas de *pipe-shop*.

Existem vários tipos de ferramentas e máquinas de corte e bisel que auxiliam a execução desta atividade. Podemos citar: ferramenta cortadora manual, máquinas de corte com faca rotativa, à laser, à plasma, à jato de água, além das biseladoras que tem como função fazer o chanfro no tubo necessário para o processo de soldagem. A figura 4.5 apresenta alguns modelos dessas ferramentas e máquinas.



Figura 4.5: Ferramentas e Máquinas de Corte e Bisel

Após o processo de corte e bisel, os tubos serão enviados para ajuste e solda. A atividade de ajuste (*fit-up*) significa em aproximar e alinhar trechos de tubos com tubos, tubos com flanges, tubos com curvas, etc. utilizando o auxílio de ferramentas apropriadas (*fit-up clamps* ou braçadeiras e máquinas de ajustes automático, ver figura 4.6).



Braçadeiras



Equipamentos de Ajuste

Figura 4.6: Ferramentas e Máquinas de Ajuste

Uma vez que as peças estiverem “ajustadas”, elas estarão prontas para iniciar o processo de soldagem, processo muito importante na fabricação de spools.

A atividade de solda envolve a utilização de diversos equipamentos, energia, mão de obra qualificada pela Classificadora e material dito “consumível”, que são definidos pela terminologia de soldagem como todos os materiais empregados na deposição ou proteção da solda. Exemplos de consumíveis são os eletrodos revestidos, as varetas, os arames sólidos e tubulares, os fluxos, os gases e os anéis consumíveis.

Existem diversos processos de soldagem utilizados na fabricação e montagem de tubulação, devido às características das peças e tipos de aços que deverão ser soldados, bem como os tipos de junta, espessura, material, posição e até mesmo local da solda. Com base nestas informações, pode-se escolher o método mais conveniente para cada tipo, o mais fácil de soldar, com menor custo e maior qualidade para as soldas.

Dentre os mais utilizados na indústria, pode-se citar os processos de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*), MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*), Eletrodo Revestido (*Shielded Metal Arc Welding - SMAW*), Arco Submerso (*Submerged arc welding - SAW*) e Arame Tubular (*Flux-cored arc welding - FCAW*). Cada processo possui características e benefícios, vantagens e desvantagens, além de equipamento próprio para que o atividade de solda ocorra. Maiores detalhes serão verificados na seção 4.2.

O processo de soldagem é bastante sensível na fabricação dos spools. Qualquer imperfeição neste processo poderá ocasionar vazamentos indesejáveis à operação dos fluidos.

Por isso, são aplicados vários testes para saber se as juntas que foram soldadas estão conforme requerido pelo processo de qualidade.

Os ensaios não destrutivos (END) são praticados a um material ou equipamento, que não altere de forma permanente suas propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais. São utilizados para detectar e avaliar discontinuidades nos materiais. Também para controle da qualidade de materiais e produtos, contribuindo para reduzir os custos e aumentar a confiabilidade dos processos associados. O END é amplamente utilizado na disciplina de tubulação como testes para verificação das juntas soldadas.

Os principais métodos empregados são: ensaio visual e dimensional, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultra-som, radiografia (“raios x” e “gama”), correntes parasitas, análise de vibrações, termografia, emissão acústica, ferritoscopia (imagem ao lado), estanqueidade e análise de deformações.

Após verificado os resultados dos testes, os spools com as juntas aprovadas seguirão para o processo de pintura, as não aprovadas deverão retornar ao processo de reparo da junta.

A pintura em tubulações se faz necessária para dar proteção anticorrosiva às superfícies metálicas, além de outras finalidades como: dar cor à superfície; melhorar a segurança industrial; favorecer uma maior ou menor absorção de calor; impermeabilizar a superfície, ou seja, impedir que a água ou a umidade cheguem até a superfície metálica; impedir a incrustação de micro-organismos.

O processo de pintura ocorre com três etapas, a saber:

1. Tinta de Fundo (*primer*): aplicada diretamente sobre o aço, é a responsável diretamente pela aderência da tinta. A tinta *primer* contém os pigmentos anticorrosivos, em alta concentração e, por isso, a tinta de fundo é sempre fosca. Uma boa tinta de fundo deve ter uma alta “molhabilidade” e poder de penetração para cobrir as reentrâncias da superfície.
2. Tinta Intermediária: o esquema de pintura pode requerer, ou não, uma tinta intermediária. Normalmente é utilizada para compatibilizar o *primer* com algumas tintas de acabamento, como por exemplo, o acabamento epóxi de alta espessura pintado sobre o *primer* de etil-silicato nas plataformas (ambiente marinho). Também pode ser usada para aumentar a espessura total, evitando muitas demãos de *primer*.
3. Tinta de Acabamento: dá proteção por barreira contra a agressividade do meio ambiente e, por isso, a tinta deve ser o mais impermeável possível. A tinta de acabamento protege o *primer*, como por exemplo, o silicato inorgânico de zinco, que resiste a altas temperaturas, mas não a gases ácidos (H_2S , SO_2 , SO_3). A tinta de acabamento também é responsável pela cor final da tinta.

A figura 4.7 apresenta um desenho esquemático das aplicações de cada tipo de tinta.



Figura 4.7: Esquemas de Aplicação de Tintas

As especificações da pintura abrangem informações de preparo da superfície metálica; das tintas de fundo, intermediária (se houver) e acabamento; número de demãos de cada tinta; espessura seca de cada demão; intervalo entre as demãos (mínimo e máximo); método de aplicação de tintas; controle de qualidade das tintas e da aplicação.

Para promover maior produtividade, qualidade e segurança na atividade de pintura, é recomendável a utilização de cabines de pintura de spools. As normas que orientam o procedimento de pintura em plataformas do tipo FPSO são as normas técnicas NBR 15156 e PETROBRAS N-13.

Depois do processo de pintura, os spools deverão ser acondicionados e preservados para evitar exposição ao clima e tempo, mantendo a qualidade do processo de fabricação. Por último, os spools serão enviados para o site de integração, onde serão montados em sua localização final (ver figura 4.8).



Preservação dos Spools



Envio dos Spools para o Site de Montagem

Figura 4.8: Preservação dos Spools

Na figura 4.9 é apresentado um típico *layout* de um *pipe-shop* para a fabricação de spools.

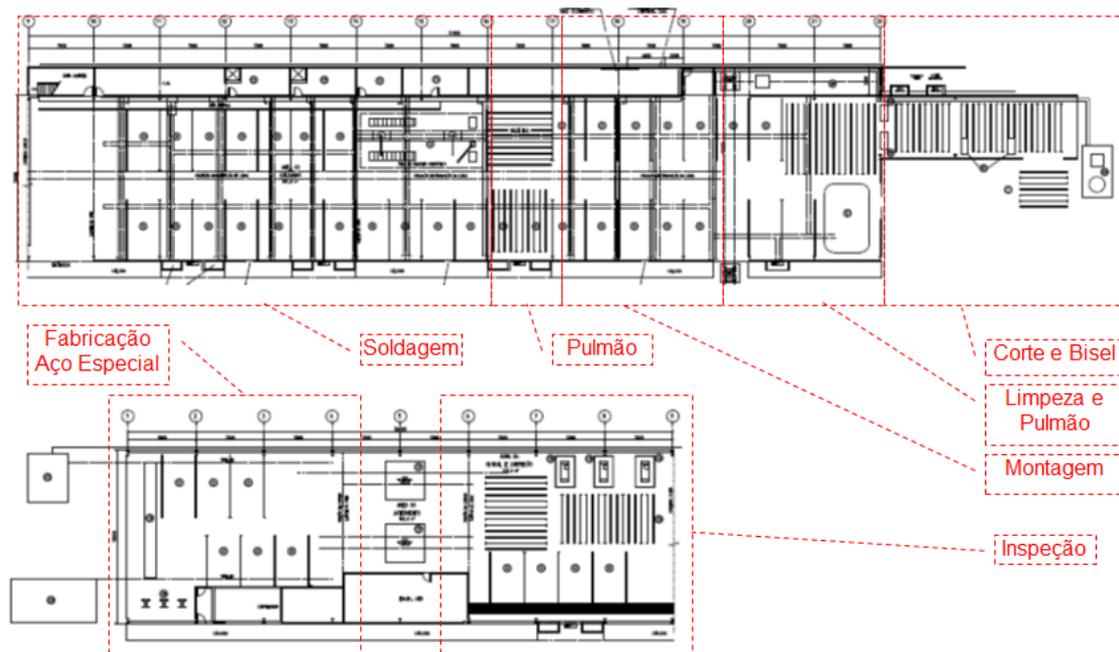


Figura 4.9: Típico *Layout* de um *Pipe-Shop*

4.1.4. Montagem

O processo de montagem se inicia a partir do recebimento dos spools fabricados no site de integração. Nesta fase, a relação de interdependência com as outras disciplinas torna-se um fator de suma importância. O sequenciamento das atividades revela-se um dos grandes desafios para o planejamento e a construtibilidade da montagem.

Conforme explicitado nas seções anteriores, a planta de processo de um FPSO resume-se em equipamentos, que exercem uma função específica de processamento dos fluidos, e seus meios de ligação, que são as tubulações que os conectam. Portanto, faz-se necessário que as estruturas dos módulos, *skids*, navio, etc. e os equipamentos estejam disponíveis e montados para que a montagem dos spools possa ocorrer de forma produtiva.

Outro fator relevante, refere-se ao sequenciamento da montagem desses spools. Existem diversos critérios de priorização dos spools que devem ser fabricados e montados que fogem ao escopo deste estudo por ser uma tarefa que envolve grande complexidade. No entanto, um bom planejamento em relação ao sequenciamento da montagem de spools pode ser um fator determinante de sucesso para a conclusão mecânica da unidade.

As atividades que ocorrem no processo de montagem dos spools são: posicionamento, ajuste, solda, inspeção e teste.

A atividade de posicionamento dos spools refere-se a identificar a localização geográfica daquele spool e realizar o içamento até sua posição final. Podemos verificar que os desenhos isométricos de tubulação dispõem desta informação. Como em muitos casos, os spools têm peso elevado, seu içamento e movimentação ocorre com auxílio de ferramentas e equipamentos como guindastes, empilhadeiras, transpaletes, cavaletes, pórtico móvel,

braços giratórios, talhas elétricas, talhas manuais, etc.

Como destacado no processo de engenharia, os spools são subdivisões das linhas, sendo assim, haverá juntas a serem soldadas em campo para que a linha fique completa. A soldagem em campo ocorre de forma semelhante às aquelas discutidas no processo de fabricação dos spools, porém com alguns complicadores a serem considerados: locais de difícil acesso, locais em altura o que exige a montagem de andaimes, locais com muita densidade e interferências com outras disciplinas. Além disso, os soldadores encontram-se nas mais variadas posições de solda (de frente, no nível do piso, sobre os ombros, sobre a cabeça) e em diferentes espaços (espaço confinado, em altura).

Nessas condições ergonômicas e de acessibilidade, a solda em campo torna-se menos produtiva do que a solda em *pipe-shop*, portanto, deve-se realizar estudos de otimização para minimizar a necessidade de soldas em campo.

As atividades de ajuste, inspeção e teste seguem os mesmos conceitos analisados no processo de fabricação, porém com as dificuldades ergonômicas e de acesso inerentes às atividades de campo.

4.1.5. Comissionamento

Por definição, o comissionamento é o processo de assegurar que os sistemas estejam projetados, instalados, testados, operados e mantidos de acordo com as necessidades e requisitos operacionais do projeto [47].

Para a disciplina de tubulação, o comissionamento se reflete na necessidade de desempenhar certas atividades para garantir a integridade dos sistemas e que a operação possa ocorrer de forma segura e eficiente.

As atividades de comissionamento que devem ser executadas como verificação da integridade do sistema, dentro da disciplina de tubulação, são: teste hidrostático, lavagem e limpeza das linhas, remontagem, decapagem, teste de estanqueidade e inertização. Vale destacar que essas atividades se confundem com as atividades de montagem, pois, em alguns casos, são executadas pela equipe de montagem. Porém, vamos classificar essas atividades destacadas aqui como atividades de comissionamento.

O Teste Hidrostático (TH) tem como principal objetivo avaliar a resistência e identificar vazamentos em um sistema de tubulação. Para isso, o primeiro passo é preencher por completo a tubulação a ser testada com um líquido (geralmente, água), até que uma pressão pré-determinada seja atingida. Então, a pressão é exercida por um certo período específico de tempo, com intuito de verificar visualmente a existência de vazamentos que devem ser controlados através de instrumentos de medição. O TH é uma atividade essencial, pois permite a identificação de possíveis vazamentos e falhas, reduzindo assim, riscos de acidentes e garantindo eficiência operacional. No Brasil, a execução do TH é regulado pela Norma Regulamentadora NR-13 (Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações).

Para eliminar as impurezas oriundas do processo de montagem, as linhas deverão ser lavadas e limpas para que o desempenho operacional do sistema de tubulação possa ocorrer conforme projetado. Existem diversos métodos que podem ser utilizados no momento de uma limpeza de tubulações e sua escolha depende do fluido operacional, do sistema envolvido, de requisitos específicos de proteção contra contaminação, do diâmetro dos tubos, entre outros. Usualmente, utilizam-se métodos como limpeza mecânica, fluxo com esferas de borracha, limpeza com água, limpeza com *pig*, sopragem de ar, *flushing* e limpeza química.

Após a limpeza das linhas, a tubulação deverá passar pela atividade de remontagem, que representa a atividade de verificação e confirmação que os componentes acessórios do sistema de tubulação estão em conformidade com a especificação do projeto. Normalmente são verificados os componentes como estojos (parafusos e porcas), juntas (metálica, espirometálicas, papelão), suportes, sentido do fluxo das válvulas, etc. estão instalados e dentro da especificação correta.

O processo de decapagem trata-se também de uma limpeza que tem como objetivo remover oxidações e impurezas inorgânicas. É utilizada normalmente em sistemas de tubulação específicos, onde o carregamento de impurezas pode danificar equipamentos como compressores, turbinas, bombas, etc. Existem diferentes tipos de processos que podem ser executados como decapagem: química, eletrolítica, mecânica, térmica.

Os testes de estanqueidade em uma FPSO são realizados também para verificação da integridade do sistema e localização de possíveis vazamentos. Nestes testes, são selecionados sistemas de tubulação mais amplo, envolvendo equipamentos e válvulas. Existem vários métodos para realizar o teste de estanqueidade em tubulações. Os mais comuns são: detecção por queda de pressão simples, detecção por pressão diferencial, detecção por fluxo de massa e detecção por variação do volume de líquido. O teste se inicia com a pressurização do sistema por ar comprimido ou gás inerte (nitrogênio), mantendo as válvulas do teste em posição aberta. Deve-se estabilizar a pressão do sistema por um período adicional e aumentar a pressão gradativamente até a pressão de teste. A pressão deve ser verificada durante todo o período de teste, não devendo ser observadas variações perceptíveis de medição. Caso seja observado diminuição de pressão de teste, o vazamento deve ser localizado e reparado.

A inertização das tubulações são requeridas para manter o sistema livre de oxidações, contaminantes e impurezas até o início da operação. O nitrogênio (*N*) é o gás inerte que não reage com a maioria dos materiais utilizados. Por isso, faz-se necessários o preenchimento do sistema de tubulação com este gás para mantê-lo inerte e protegido.

4.2. Processo de Soldagem de Tubulação

Na seção 4.1, podemos observar que o processo de soldagem destaca-se como um dos principais processos para que se obtenha o sucesso de um projeto de FPSO. Por isso, requer um grande empenho por parte dos gestores em seu planejamento e execução, seja na produtividade da mão de obra e equipamentos, seja nas técnicas de inspeção da qualidade.

Conforme veremos em maiores detalhes adiante, existem diversos processos de soldagem e inspeção. A escolha correta de cada tipo depende, principalmente, do local e posição em que está ocorrendo a solda, dos recursos disponíveis, dos tipos de materiais empregados e da qualidade da solda que se deseja obter.

4.2.1. Tipos de Solda

A seguir podemos apresentar as principais características, vantagens e desvantagens de cada processo de soldagem:

- TIG (*Tungsten Inert Gas*): é um processo de soldagem a arco elétrico, criado entre um eletrodo não consumível de tungstênio e o material a soldar, envolto por um gás de proteção, normalmente utilizado um gás inerte como Hélio (*He*), Argônio (*Ar*) ou a mistura dos dois.

Vantagens: excelente qualidade de solda, ótimas propriedades mecânicas e de acabamento do cordão de solda, livre de respingos, controle independente da fonte de calor e do material de adição, processo permite automação.

Desvantagens: necessidade de maior destreza e coordenação do operador, maior custo em relação aos processos de eletrodos consumíveis para espessuras a 10 mm, pode ocorrer contaminação da solda caso o metal de adição não for adequadamente protegido.

- MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*): processo de soldagem por arco elétrico entre a peça e o consumível em forma de arame, eletrodo não revestido, fornecido por um alimentador contínuo, realizando uma união de materiais metálicos pelo aquecimento e fusão. O arco elétrico funde de forma contínua o arame à medida que é alimentado à peça de fusão.

Vantagens: excelente qualidade, ótimo acabamento do cordão de solda, alta taxa de deposição do metal de solda, alta velocidade de soldagem, baixo custo, pode ser executada em todas as posições, pode ser automatizado, facilidade de operação.

Desvantagens: complexa regulagem do processo, maior probabilidade de gerar porosidade no cordão de solda, produção de respingos, não aplicável em áreas de difícil alcance.

- Eletrodo Revestido (*Shielded Metal Arc Welding* - SMAW): processo manual de soldagem que é realizado com o calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho. O calor produzido pelo arco elétrico funde o metal, a vareta (alma do eletrodo) e seu revestimento de fluxo.

Vantagens: baixo custo, não há necessidade de suprimento de gases, flexibilidade de aplicação, grande variedade de consumíveis, equipamentos podem ser usados também para outros processos.

Desvantagens: baixa produtividade, necessidade de cuidados especiais com os eletrodos, volume alto de gases e fumaças gerados no processo.

- Arco Submerso (*Submerged arc welding* - SAW): processo de soldagem onde um arco é formado entre a peça de trabalho e o final do consumível, em que ambos estão cobertos por uma camada de fluxo granular. Parte do fluxo é fundida gerando uma capa protetora sobre a poça de fusão da solda. O restante não fundido é recolhido para a reutilização.

Vantagens: alta produtividade, altas velocidades de soldagem, altas taxas de deposição, boa integridade do metal de solda, processo de fácil utilização, melhor ambiente de trabalho e maior segurança para o operador.

Desvantagens: limitação de soldagem nas posições plana e horizontal, aplicável em tubos de maior espessura, normalmente limitado a juntas de topo.

- Arame Tubular (*Flux-cored arc welding* - FCAW): é um processo que promove a união de metais pelo aquecimento destes através de um arco elétrico estabelecido entre a ponta do arame e a peça de trabalho. A proteção da poça de fusão e do arco elétrico pode ser feita pelo fluxo contido no interior do arame (no caso de arames tubulares autoprotetidos) ou por uma fonte gasosa externa. Esta proteção gasosa é realizada na maioria das vezes utilizando 100% de CO_2 e em alguns casos utilizando misturas 75% de Argônio (Ar) e 25% de CO_2 .

Vantagens: alta taxa de deposição do metal de solda, alta velocidade de soldagem, soldagem pode ser executada em todas as posições, não é necessário gás de proteção no processo tornando-o adequado para a soldagem ao ar livre ou em condições de vento, pode ser automatizado.

Desvantagens: ocorrência de fusão incompleta entre os metais base, rachaduras nas soldas e porosidade.

4.2.2. Posicionamento de Soldagem

No processo de soldagem de fabricação e montagem das tubulações, os soldadores estão submetidos a diversas posições de solda que podem ser classificadas em: plana, horizontal, vertical, sobre-cabeça.

De acordo com a *American Welding Society* (AWS) e *American Society of Mechanical Engineers* (ASME), as nomenclaturas de posições de soldagem são descritas por um dígito (1,2 ,5 e 6), seguido de uma letra, “F” para juntas em ângulo (*fillet*) e “G” para juntas em chanfro (*groove*). Por sua vez, a *International Organization for Standardization* (ISO) possui nomenclatura diferenciada, porém de ideia muito similar.

A tabela 4.2 abaixo representa os tipos considerados na posição de soldagem de tubulações, conforme BS EN ISO 6947:2011, ASME IX e AWS D1.1.

Tabela 4.2: Posição de Soldagem

Posição de Solda (ASME / AWS)	Posição de Solda (ISO)	Descrição
1G / 1F	PA	Plana (ângulo e chanfro)
2F	PB	Horizontal (ângulo)
2G	PC	Horizontal (chanfro)
3G / 3F Uphill	PF	Vertical ascendente (ângulo e chanfro)
3G / 3F Downhill	PG	Vertical descendente (ângulo e chanfro)
4F	PD	Sobre-cabeça (ângulo)
4G	PE	Sobre-cabeça (chanfro)
5G / 5F Uphill	PH	Plana, vertical e sobre-cabeça ascendente (ângulo e chanfro)
5G / 5F Downhill	PJ	Plana, vertical e sobre-cabeça descendente (ângulo e chanfro)
6G Uphill	H-L045	Inclinada ascendente (chanfro)
6G Downhill	J-L045	Inclinada descendente (chanfro)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Na figura 4.10, podemos acompanhar esquematicamente os diversos tipos de posição de solda.

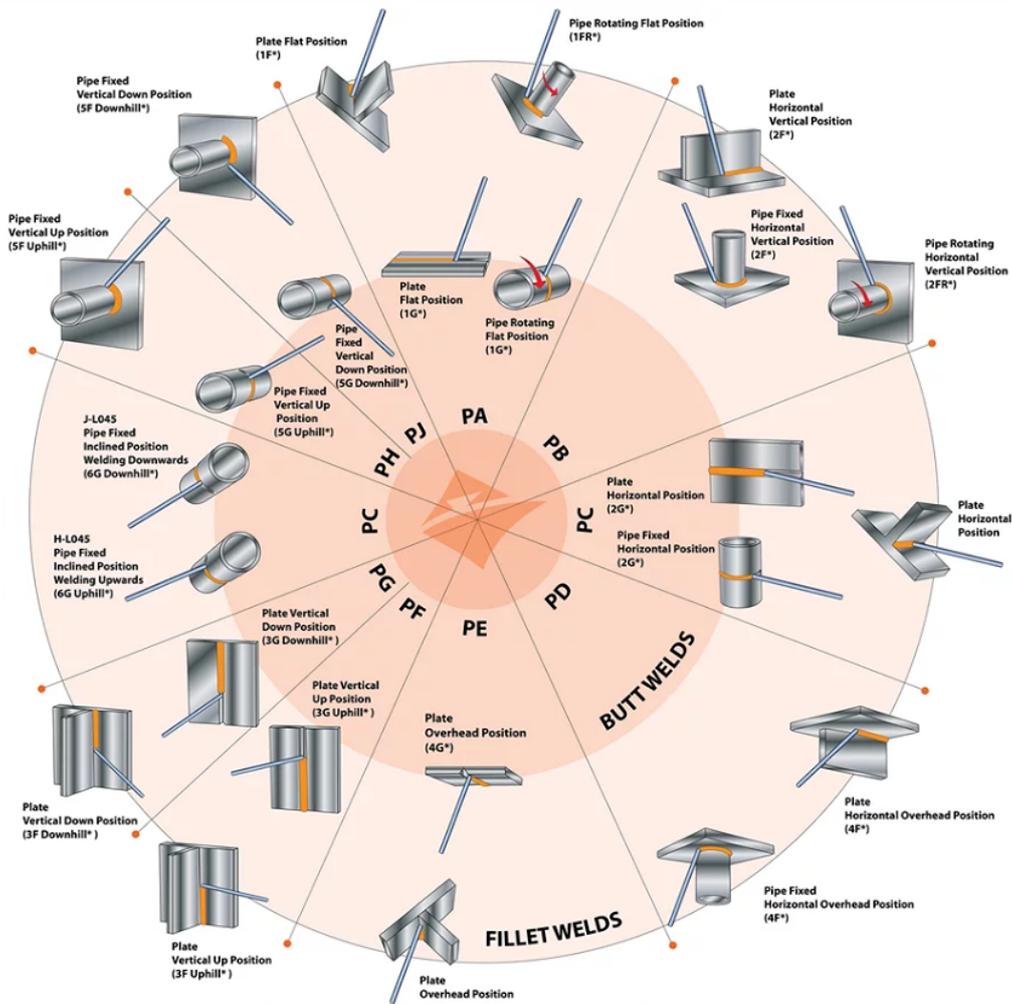


Figura 4.10: Desenho das Posições de Solda

A posição da soldagem é fator relevante para medir a complexidade de soldagem, devido à dificuldade de manter o controle da solda em condições adversas de posicionamento. No entanto, a escolha da posição é intrinsecamente determinada pelo projeto de engenharia e as condições de fabricação e montagem, não cabendo ao soldador sua escolha. Adaptações na postura corporal (ergonomia) do soldador, assim como a posição do ângulo e chanfro, devem ser levadas em consideração para possibilitar a soldagem em determinada posição.

A posição de soldagem é, em última instância, consequência direta da estratégia de fabricação e montagem de tubulações e tem grande influência na produtividade e complexidade na realização desta atividade.

4.2.3. Ensaios Não-Destrutivos

Os ensaios não destrutivos (END) são utilizados para detectar e avaliar falhas nos materiais. Estas, geralmente, são caracterizadas por trincas, poros, inclusões de materiais no cordão de solda ou ainda variações nas propriedades estruturais que podem levar à perda

da resistência e posteriormente à falha do material.

Os principais métodos de ensaios não destrutivos utilizados no processo de soldagem de uma FPSO são:

- Inspeção Visual (IV) : técnica visual aplicada por um profissional qualificado e experiente. Com a utilização dos próprios olhos e com auxílio de ferramentas para análise como lupas, microscópios, projetores óticos, gabaritos e comparadores, tem o objetivo de detectar não somente falhas na superfície ou distorções na estrutura, mas também o grau de acabamento e de formato de uma peça.
- Partículas Magnéticas (PM) : consiste em submeter uma junta a um campo magnético. Na região magnetizada da peça, as discontinuidades existentes, ou seja, a falta de continuidade das propriedades magnéticas do material, irão causar um campo de fuga do fluxo magnético. A aplicação das partículas ferromagnéticas provoca a aglomeração destas nos campos de fuga, uma vez que serão por eles atraídas devido ao surgimento de pólos magnéticos. A aglomeração indicará o contorno do campo de fuga, fornecendo a visualização do formato e da extensão da discontinuidade.
- Líquido Penetrante (LP) : teste em que aplica-se uma camada de líquido penetrante na junta a ser ensaiada, remove-se o excesso e, com o revelador, é possível identificar a região em que há penetração do líquido, indicando trincas ou porosidade no material. O ensaio por líquidos penetrantes presta-se a detectar discontinuidades superficiais e que sejam abertas na superfície, tais como trincas, poros, dobras, etc. A principal vantagem do método é a sua simplicidade por ser de fácil aplicação e interpretação dos resultados.
- Ultrassom (US) : consiste na emissão de uma onda por um transdutor e, a partir do momento em que a onda é emitida, o aparelho começa a contar o tempo. Ao incidir na discontinuidade, ocorre uma reflexão da onda que retorna ao transdutor e gera um sinal elétrico, no qual é processado e mostrado na tela do aparelho de análise, sendo a posição do eco proporcional ao caminho percorrido pelo som até a discontinuidade da peça. Possui boa sensibilidade na detecção de discontinuidades internas e não requer planos especiais de segurança.
- Radiografia (RX) : consiste na emissão de raios (x ou gama), onde uma parte é absorvida pelo material e a outra atravessa a junta, sensibilizando o filme e produzindo uma imagem. Este ensaio é aplicado em juntas que exijam alta confiabilidade na detecção de falhas. Normalmente são emitidos doses de radiação elevadas, o que exige um grande nível de segurança da área a ser aplicada.

4.2.4. Complexidade de Soldagem

A soldagem de tubulações em uma FPSO possuem algumas características específicas em relação ao processo de soldagem de chapas de aço. Podemos considerá-las como variáveis do processo de soldagem, pois cada linha e cada spool terá combinações particulares destas variáveis. Essas características são levadas em consideração neste estudo para medição da complexidade, a saber:

- Material: dividem-se em aço carbono e aços especiais (aço inoxidável, duplex, superduplex, cobre-níquel).
- Local: em relação ao local, o processo de soldagem de tubulações pode ocorrer tanto no *pipe-shop* (fabricação) quanto em campo (montagem).
- Tipos de Juntas: podem ser juntas de topo, de ângulo, de rosca, “boca de lobo” e suporte (ver seção 4.2.5).
- Diâmetro: corresponde ao diversos diâmetros internos e externos que podemos encontrar nas especificações dos tubos.
- Espessura: corresponde a altura da parede do tubo, que são especificadas a partir dos diversos *schedules*, conforme designado em normas.

A partir desses dados, podemos calcular as diferentes complexidades (volume e pesos da solda) dos diversos tipos de juntas, a depender da combinação das variáveis descritas acima.

4.2.5. Tipos de Juntas

Juntas de soldagem é uma aresta ou ponto onde duas ou mais peças de metal são unidas. As peças de trabalho (metal ou plástico) são unidas com a ajuda de um processo de soldagem adequado para formar uma junta forte.

As juntas soldadas podem ser inicialmente preparadas de várias maneiras, que incluem atividades como: cisalhamento, fundição, forjamento, usinagem, preenchimento, roteamento, corte oxiacetilénico (processo de corte térmico), corte por arco plasma (processo de corte térmico), esmerilhamento.

As juntas normalmente encontradas em soldas de tubulações são as juntas de topo, de ângulo, de rosca, “boca de lobo” e suporte.

- Juntas de Topo (*butt joint*) são as mais frequentes em projetos de tubulação (ver figura 4.11). A junção, que é formada colocando as extremidades de duas partes, é chamada de junção de extremidade. As duas partes estão no mesmo plano ou lado a lado. Correspondem as soldas ao longo de uma costura com borda (chanfro)

de ponta a ponta. Possuem diversos tipos de chanfro, a depender da espessura e materiais e do procedimento de soldagem escolhido (ver figura 4.12).

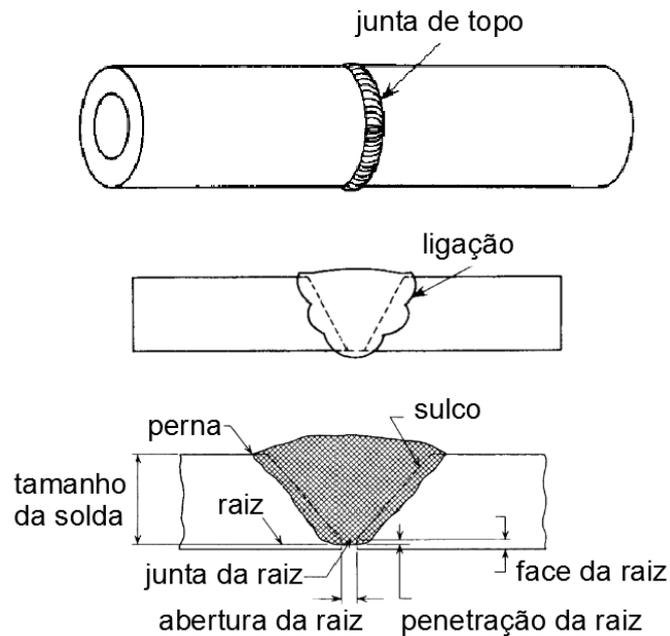


Figura 4.11: Junta de Topo

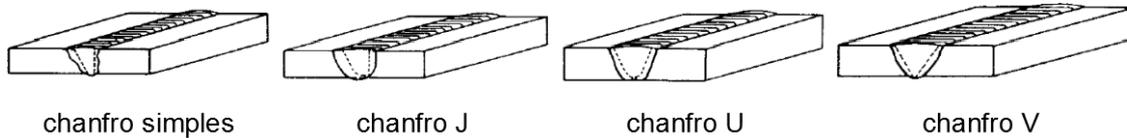


Figura 4.12: Tipos de Chanfro

- Juntas de Ângulo e de Encaixe (*corner joint* e *socket joint*) são junções entre duas partes localizados em ângulos entre si sob a forma de um "L", podendo assumir ângulos variados.

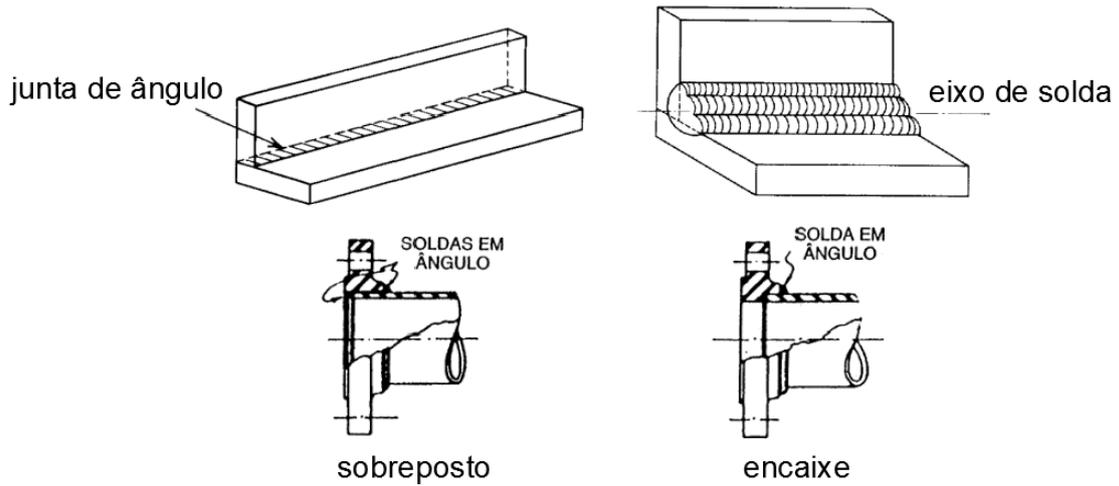


Figura 4.13: Junta de Ângulo

- Juntas Roscadas (*bolted joint*) são derivadas de conexões roscadas que ainda necessitam de solda para manter a integridade da união (ver figura 4.14).

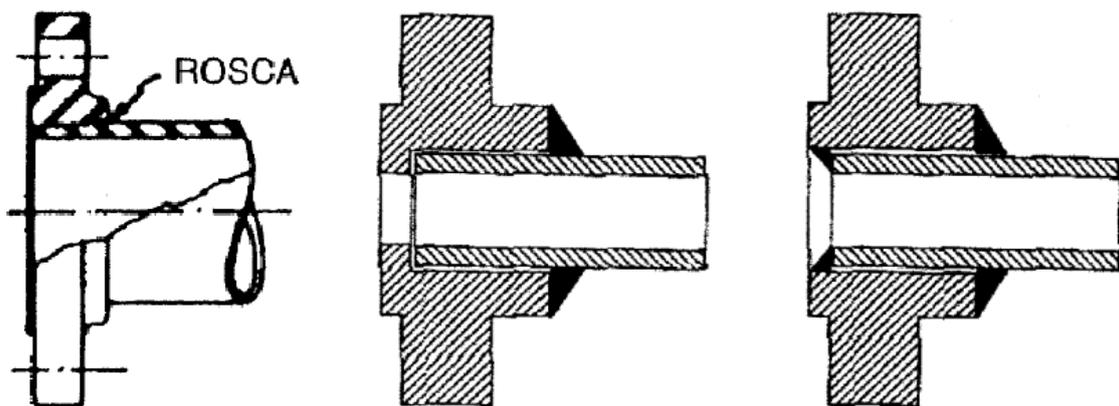


Figura 4.14: Junta Roscada

- Juntas “Boca de Lobo” (*T-joint*) são juntas que interligam tubulações normalmente em formato “T”, abrindo ramificações ou conectando ramais de tubos (ver figura 4.15).

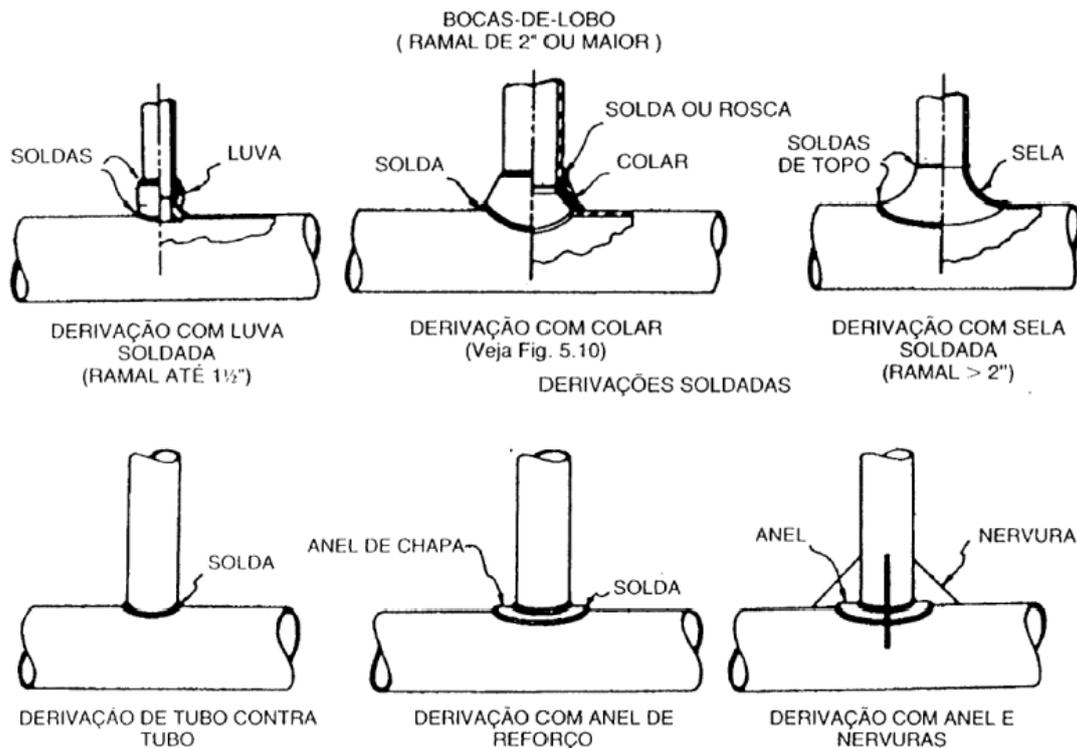


Figura 4.15: Junta “Boca de Lobo”

- Juntas de Suporte são aplicáveis para tipos específicos de suportes de tubulação e deverão possuir o mesmo material do tubo. A seleção apropriada dos suportes deve ser o objetivo de todas as fases do projeto. A seleção correta e econômica dos suportes para qualquer sistema de tubulação geralmente apresenta dificuldades de vários graus, algumas relativamente menores e outras de natureza crítica.

Um bom projeto de suporte de tubulação começa com um bom *design* e *layout* de tubulação. Deve ser projetada para usar as estruturas da FPSO, onde houver pontos de apoio lógicos e convenientes, ancoragem, orientação, restrição, com espaço disponível em tais pontos para uso do suporte adequado.

As especificações de suporte de tubulação devem ser projetadas de tal forma que garantam o apoio adequado sob todas as condições operacionais e ambientais e para fornecer inclinação, expansão, ancoragem e proteção de isolamento.

Na figura 4.16, podemos verificar alguns exemplos de suportes que necessitam de solda com os tubos que suportam.

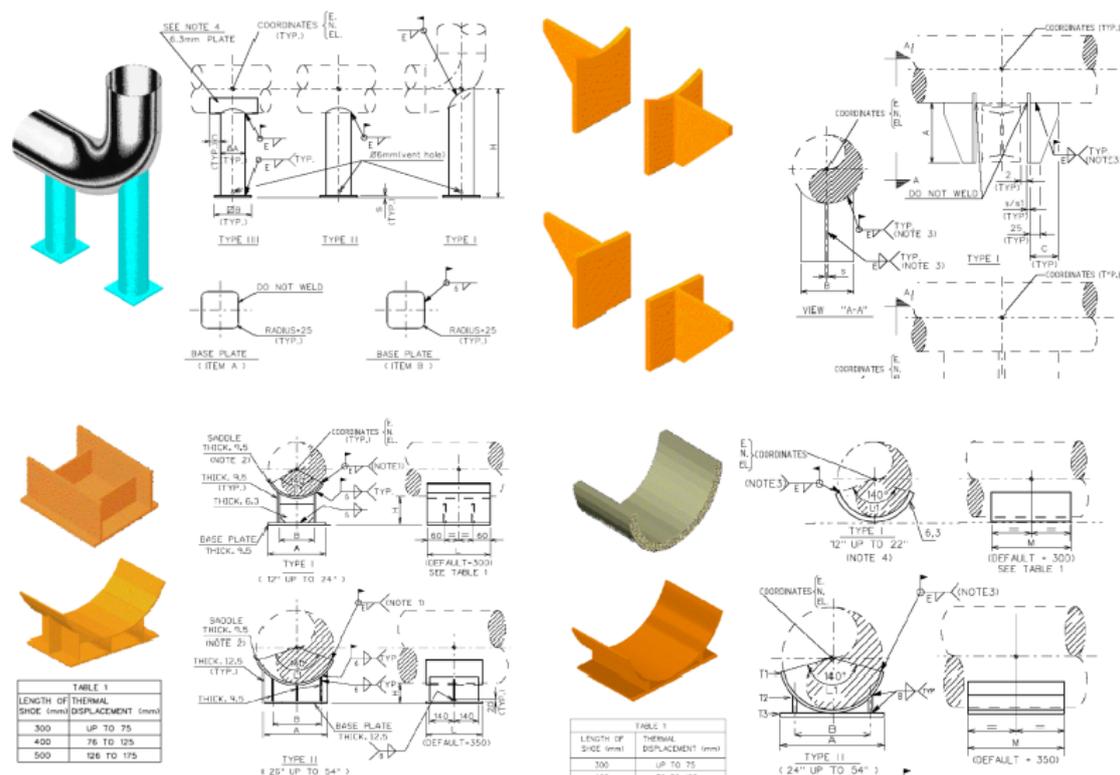


Figura 4.16: Junta de Suporte

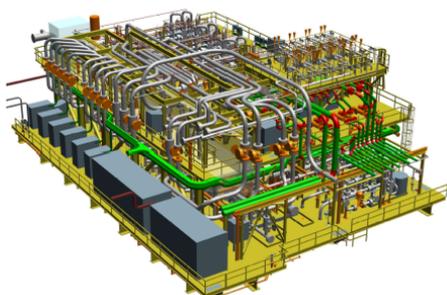
4.3. Densidade

Nesta seção, iremos introduzir o conceito de “densidade” na construção e montagem da uma FPSO. Conforme vimos anteriormente, a composição de uma FPSO está dividida em diversas disciplinas (naval, estrutura, mecânica, tubulação, elétrica, instrumentação, etc.) que devem seguir o melhor sequenciamento para determinar o sucesso do projeto.

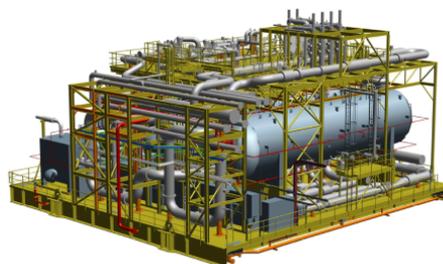
Por se tratar de uma pequena indústria de processamento primário de separação e tratamento de óleo, gás e água à bordo de uma embarcação, as especificações técnicas (ETs) de uma FPSO seguem padrões mais “precisos” que padrões de uma refinaria, por exemplo. Pela área reduzida e pela constante falta de espaço que podemos observar nestes projetos, faz-se necessário verificar o impacto na construção e montagem das diversas disciplinas relacionadas entre si. Ou seja, no planejamento das atividades devemos verificar sempre a dificuldade de construção e montagem da disciplina subsequente devido à constante falta de espaço e possíveis colisões (*clashes*) entre as disciplinas. Estes fatores certamente devem ser analisados para determinar a complexidade de construção e montagem em determinado módulo ou área da FPSO.

Para entender melhor os critérios de “densidade”, podemos observar na figura 4.17 que determinados módulos possuem “concentrações” de disciplinas mais elevadas. No lado esquerdo superior, temos um módulo de alta densidade e, assim por diante, encon-

traremos módulos com baixa densidade, como o módulo de recebimento de cargas, por exemplo. Portanto, áreas ou módulos mais concentrados tendem a apresentar dificuldades de construção e montagem maiores que áreas mais simplificadas e menos concentradas.



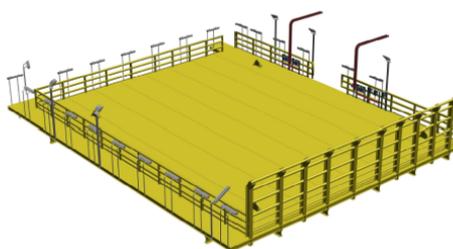
Pig Launchers/Receivers and Manifold



Oil Processing - Separators



Booster Compression



Laydown Area

Figura 4.17: Densidade dos Módulos

Nas unidades de produção que operam nas áreas do pré-sal brasileiro, os desafios relacionados ao tratamento do gás natural e seus contaminantes (principalmente H_2S e CO_2) e da água produzida, que atualmente requerem concentrações de contaminantes e óleo cada vez mais reduzidas antes de seu descarte ao mar, determinam a dificuldade relacionada à “densidade” das disciplinas. Como ponto de referência, atualmente podemos verificar unidades que atingem mais de 40 mil toneladas de peso de *topside* para adequar à planta de processo aos desafios do desenvolvimento da produção no pré-sal.

4.4. Modelo Proposto

Diante do exposto nas seções anteriores, podemos iniciar os estudos das complexidades na construção e montagem de uma FPSO baseado nos conceitos explorados até o momento. Para isso, seguiremos o modelo proposto apresentado abaixo para determinar os indicadores de complexidades que iremos levantar no estudo de caso a ser analisado posteriormente.

4.4.1. Complexidade de Forma

Conforme apresentado por [7], a complexidade de forma refere-se à capacidade de realizar a fabricação individualizada de partes do produto.

Para trazer este conceito dentro da fabricação e montagem de tubulações, os parâmetros foram medidos em relação a cada *spool* individualmente. Com os dados de peso, diâmetro, espessura, comprimento dos *spools*, podemos medir parâmetros como área externa, área interna, volume real (tubo “vazio”), volume nominal (tubo “cheio”), área lateral da superfície (A), raio da esfera, área lateral da esfera (A_s), esfericidade (ψ) e complexidade de forma (C_{sh}), através das fórmulas abaixo:

- Área externa do cilindro = $\pi \times \text{diâmetro} \times \text{comprimento}$
- Área interna do cilindro = $\pi \times (\text{diâmetro} - \text{espessura}) \times \text{comprimento}$
- Volume real = $\pi \times (\text{raio})^2 - [(\text{raio} - \text{espessura})^2] \times \text{comprimento}$
- Volume nominal = $\pi \times (\text{raio})^2 \times \text{comprimento}$
- $A = \text{área interna} + \text{área externa} + 2\pi \times (\text{raio})^2 - [(\text{raio} - \text{espessura})^2] \times \text{comprimento}$
- $C_{sh} = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - \psi)}{n}$
- $\psi = \frac{A_s}{A} = \frac{\pi^{1/3}(6V)^{2/3}}{A}$

4.4.2. Complexidade de Montagem

A complexidade de montagem [7] refere-se à capacidade de montar os componentes do produto. Mede o nível de diversidade e interconectividade entre as partes. Este índice afere a complexidade da hierarquia contida no produto, descrevendo o produto em árvores, com itens e sub-itens.

Assim, a complexidade de montagem pode ser resumida pela equação:

$$\text{➤ } C_{as} = C \left[\bigcup_{i=1}^n T_i \right] = \sum_{i=1}^n C(T_i) + N_T \log_2(2^{k_T} - 1)$$

Onde podemos considerar que os parâmetros N_T e k_T correspondem a quantidade de *spools* pertencentes a um determinado módulo ou área e não são isomórficos entre si, respectivamente. Na prática, dificilmente encontraremos *spools* idênticos, pois são trechos de tubulações com uma gama de combinações de diâmetros, material, espessura, comprimento, etc.

Dessa forma, podemos medir a complexidade de montagem nas diversas hierarquias das tubulações (*spools*, linha, módulo ou área, unidade).

4.4.3. Complexidade de Material

A complexidade de material [7] refere-se ao uso de diferentes tipos de material aplicado em um produto. Sua medição pode variar de acordo com o material que está sendo considerado, conforme fórmula abaixo:

$$\text{> } C_{mt} = C_{pt} + C_{st}$$

Onde podemos medir a complexidade de material pela contagem de *spools* que possuem as mesmas variáveis de diâmetro, material e espessura, dentro de um módulo ou área.

4.4.4. Complexidade de Soldagem

A complexidade de soldagem está associada ao volume de solda que será depositado nos diferentes tipos de juntas. Para isso, o volume de solda foi calculado através de simplificações geométricas considerando o tipo de junta referente àquela solda.

1. Juntas de Topo:

O volume de solda para as juntas de topos foram calculados a partir das áreas apresentadas conforme figura 4.18 abaixo. Nesta figura, podemos calcular a área de solda a partir das variáveis de ângulo (b), espessura (t), *gap* (g), altura enchimento (w) e nariz (n).

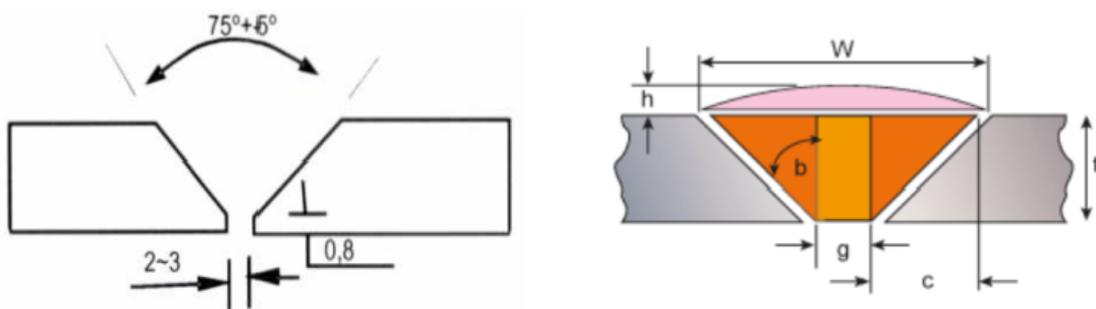


Figura 4.18: Área da Junta de Topo

Uma vez determinada a área da junta, calculamos o volume de solda considerando o comprimento da circunferência através da fórmula: $\text{Volume} = 2\pi r \times \text{área}$.

2. Junta de Ângulo:

Utilizando-se do mesmo conceito das juntas de topo, calculamos as áreas das juntas de ângulo considerando as variáveis altura (z) e largura (z) (ver figura 4.19). Para cálculo do volume, utilizamos a fórmula: $\text{Volume} = 2\pi r \times \text{área}$.

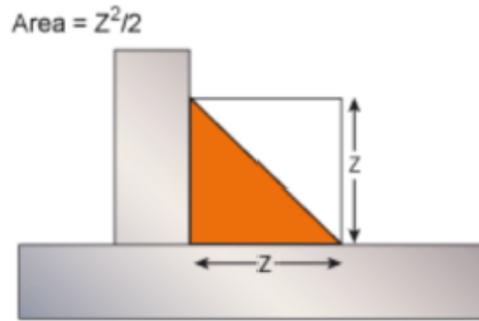


Figura 4.19: Área da Junta de Ângulo

3. Junta Roscada:

Conforme explicado na seção 4.2.5, as juntas roscadas necessitam de depósito de solda para dar maior estanqueidade as juntas. As áreas e volumes foram calculadas pelo mesmo conceito das juntas de ângulo.

4. Junta “Boca de Lobo”:

No cálculo das áreas das juntas de “Boca de Lobo”, utilizamos como regra a área dos triângulos ($\text{Área} = \frac{\text{Base} \times \text{Altura}}{2}$), conforme destacado na figura 4.20, tendo como variáveis o ângulo (θ), base (a), altura (h).

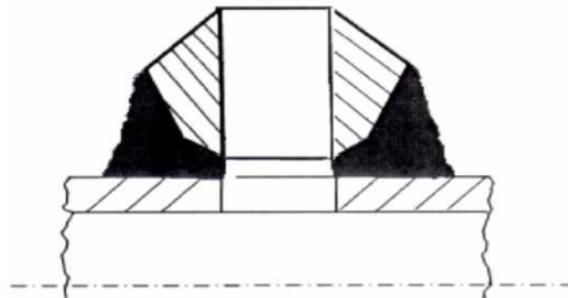


Figura 4.20: Área da Junta “Boca de Lobo”

5. Junta de Suporte:

Para cálculo das áreas das juntas de suporte foram utilizadas as variáveis diâmetro (d), espessura (e), lateral (l), altura (z) e largura (z) (ver figura 4.21). Para cálculo do volume, utilizamos a fórmula: $\text{Volume} = 2\pi r \times \text{área}$.

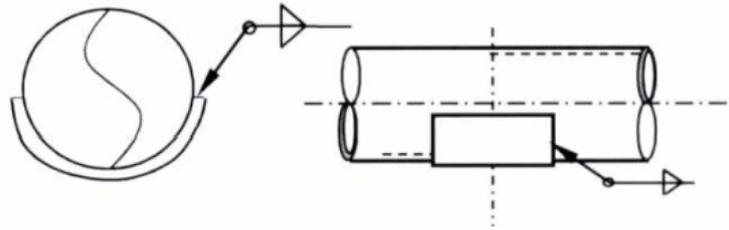


Figura 4.21: Área da Junta de Suporte

4.4.5. Complexidade de Densidade

Para calcular a complexidade de densidade, foi realizada uma análise por módulo ou área através do volume de tubulação que está inserido dentro do “cubo”, delimitado pelas coordenadas X, Y, Z que representam os limites dos módulos ou áreas (ver figura 4.22).

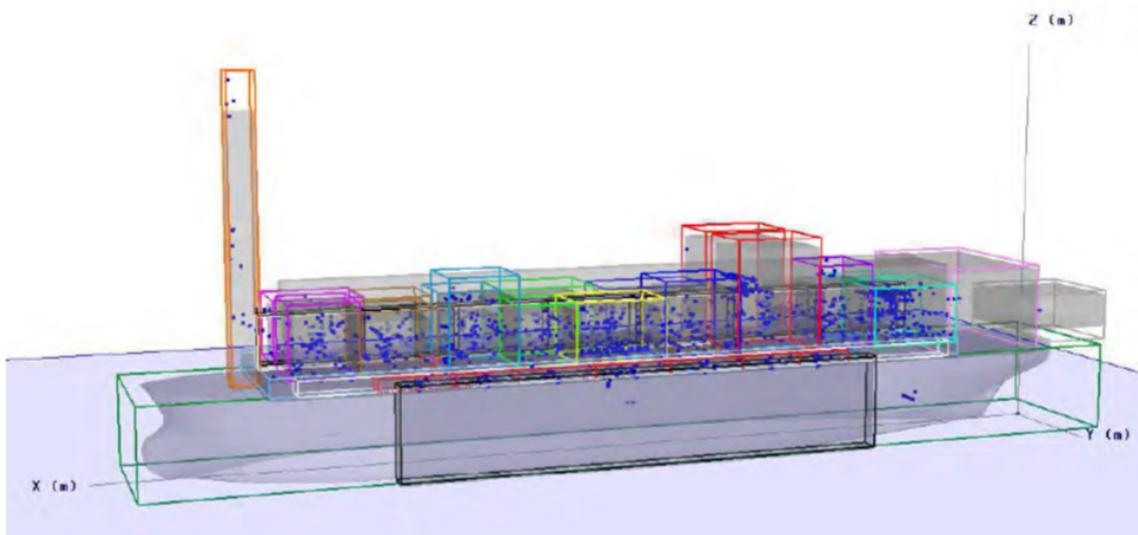


Figura 4.22: Limites dos Módulos

O volume de tubulação foi calculado geometricamente através das variáveis de diâmetro e comprimento dos tubos. Neste caso, não foram considerados os materiais de montagem como válvulas por exemplo.

Capítulo 5

ESTUDO DE CASO

Ao longo de todo este estudo, o modelo proposto para levantamento e análise dos indicadores de complexidade foi apropriadamente apresentado e fundamentado. Nesta seção, iremos abordar o estudo de caso para duas unidades do tipo FPSO, construídas em estaleiros brasileiros diferentes, ao qual este estudo teve acesso, de forma a aplicar pioneiramente o modelo. Vale ressaltar que para este estudo foram considerados os sistemas de *topside* de cada plataforma para aferição dos indicadores.

Através de aplicação do modelo e cálculo dos indicadores de complexidade, planeja-se aferir se há correlação entre os indicadores de complexidade e as durações realizadas das atividades de fabricação e montagem das tubulações. O objetivo é observar se os resultados gerados são compatíveis com o comportamento real da fabricação e montagem de tubulação.

5.1. Características Gerais dos FPSOs

Para este estudo foram obtidos os dados de projeto de duas unidades do tipo FPSO e suas principais características podem ser observadas abaixo:

Unidade 1:

- Capacidade de processamento de óleo: 180 mil barris por dia (bpd).
- Capacidade de tratamento e compressão de gás: 6 milhões m^3/d .
- Capacidade de tratamento e injeção de água: 42 mil m^3/d .
- Poços: 14 produtores e 8 injetores.
- Capacidade de geração de energia: 100 MW.
- Casco: Convertido.
- Capacidade de estocagem de óleo: 1,4 milhões de barris.

- Comprimento: 330 metros.
- Peso: 60.500 ton (líquido).
- Acomodações: 160 pessoas.
- Sistema de ancoragem: *spread mooring*.
- Lâmina d'água: 1.600 metros.

Unidade 2:

- Capacidade de processamento de óleo: 150 mil barris por dia (bpd).
- Capacidade de tratamento e compressão de gás: 7 milhões m^3/d .
- Capacidade de tratamento e injeção de água: 32 mil m^3/d .
- Poços: 9 produtores e 9 injetores.
- Capacidade de geração de energia: 100 MW.
- Casco: Convertido.
- Capacidade de estocagem de óleo: 1,4 milhões de barris.
- Comprimento: 328 metros.
- Peso: 65.000 ton (líquido).
- Acomodações: 160 pessoas.
- Sistema de ancoragem: *spread mooring*.
- Lâmina d'água: 1.950 metros.

Diante das características apresentadas acima, podemos verificar que ambas unidades tem características semelhantes em termos de capacidade de processamento de óleo, compressão de gás e injeção de água, peso, comprimento, etc., embora possuam particularidades de processamento em suas plantas.

Considerando a disciplina de tubulação das duas unidades, podemos observar características como quantidades de *spools* por polegada e peso dos *spools* por polegada, representadas nos gráficos abaixo:

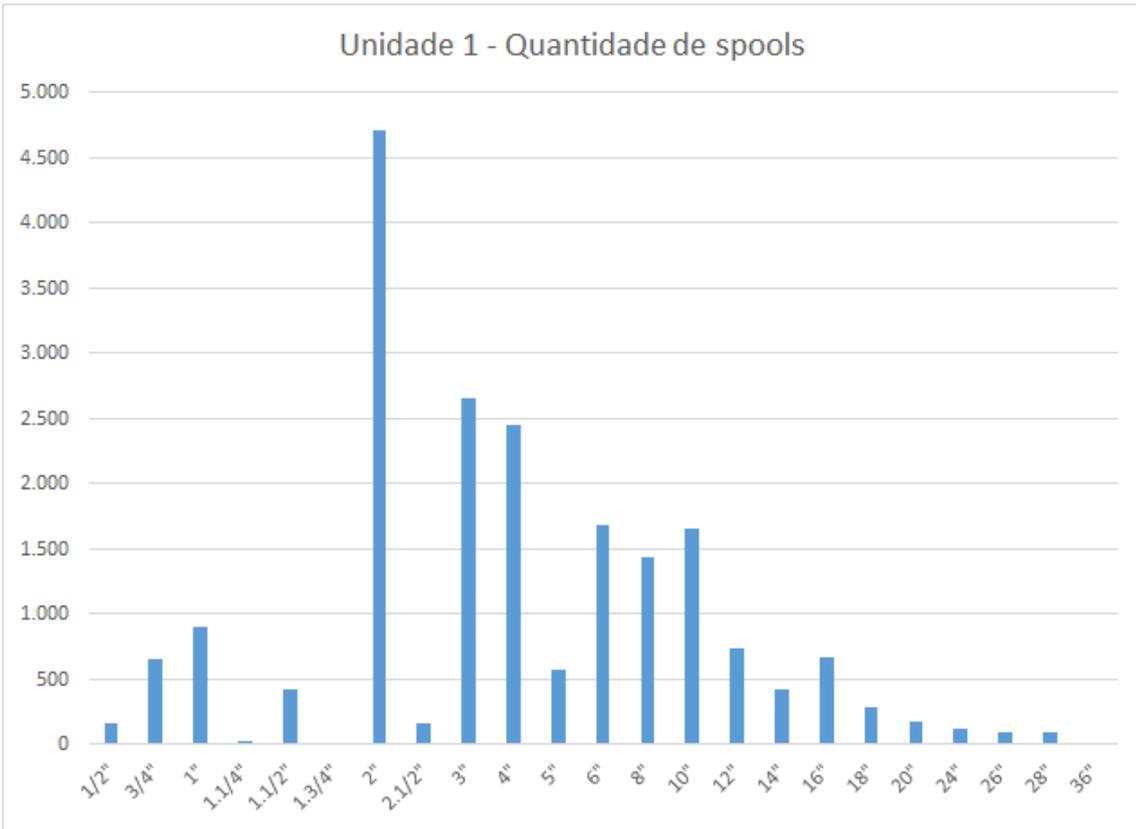


Figura 5.1: Unidade 1 - Quantidade de spools

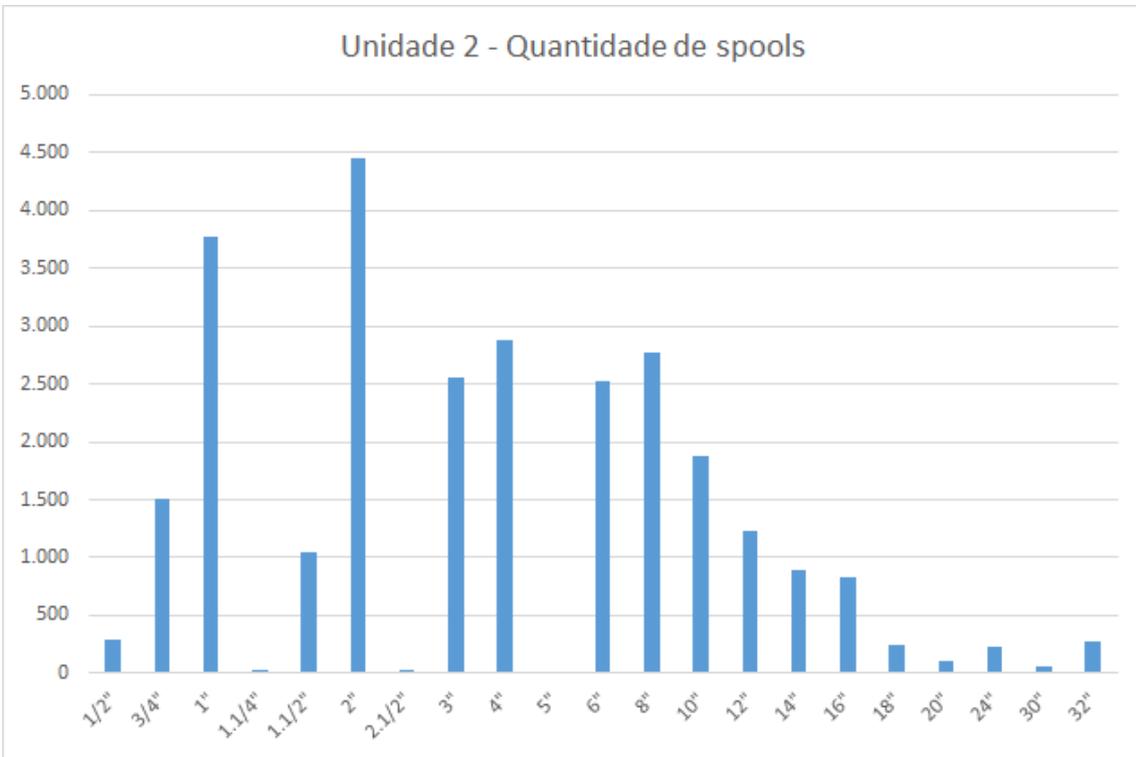


Figura 5.2: Unidade 2 - Quantidade de spools

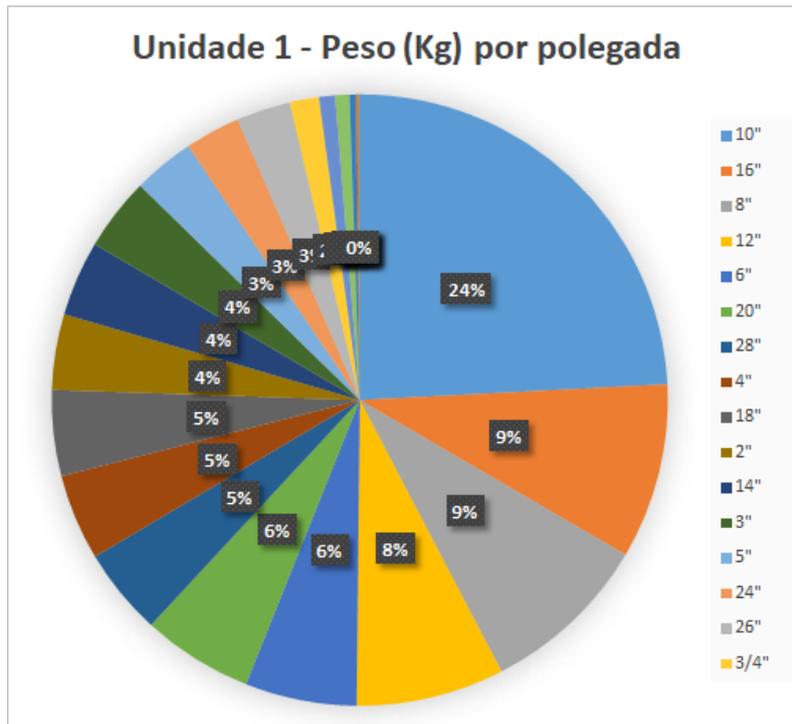


Figura 5.3: Unidade 1 - Peso (kg) por polegada

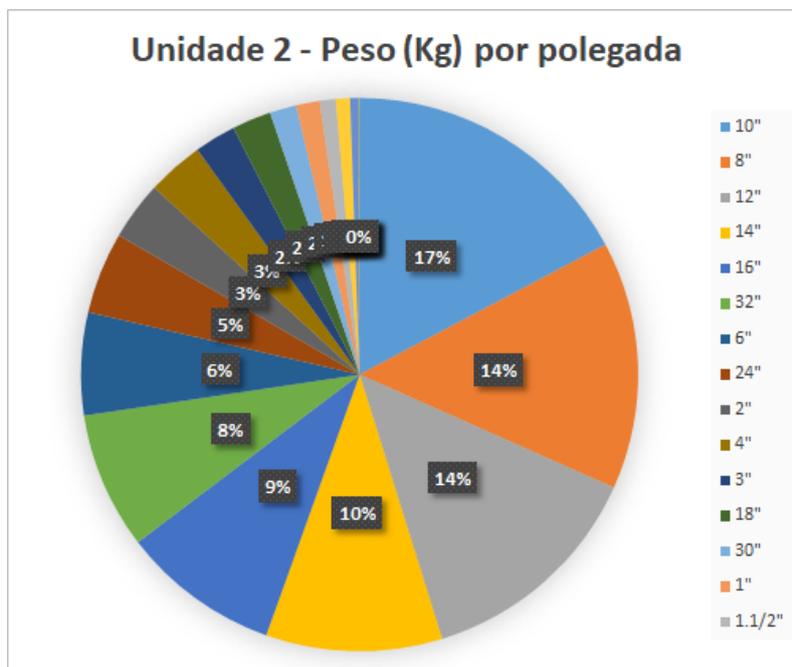


Figura 5.4: Unidade 2 - Peso (kg) por polegada

Podemos verificar nos gráficos acima que existe uma quantidade elevada de *spools* de polegadas menores, embora, em termos de peso, os diâmetros de maior polegada concentram maior parte dos *spools*.

Outras características das tubulações das unidades como espessura (*mm*), comprimento (*m*), área (*m²*) e peso (*kg*) podem ser apresentadas pelos gráficos *box-plot* e his-

togramas. Dessa forma, podemos observar como os *spools* estão distribuídos estatisticamente.

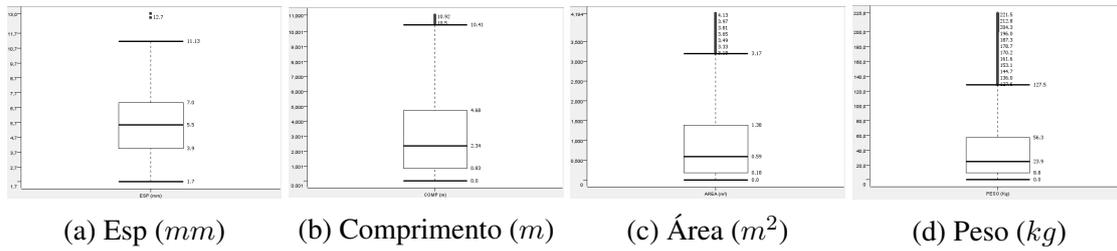


Figura 5.5: Unidade 1 - Box Plot

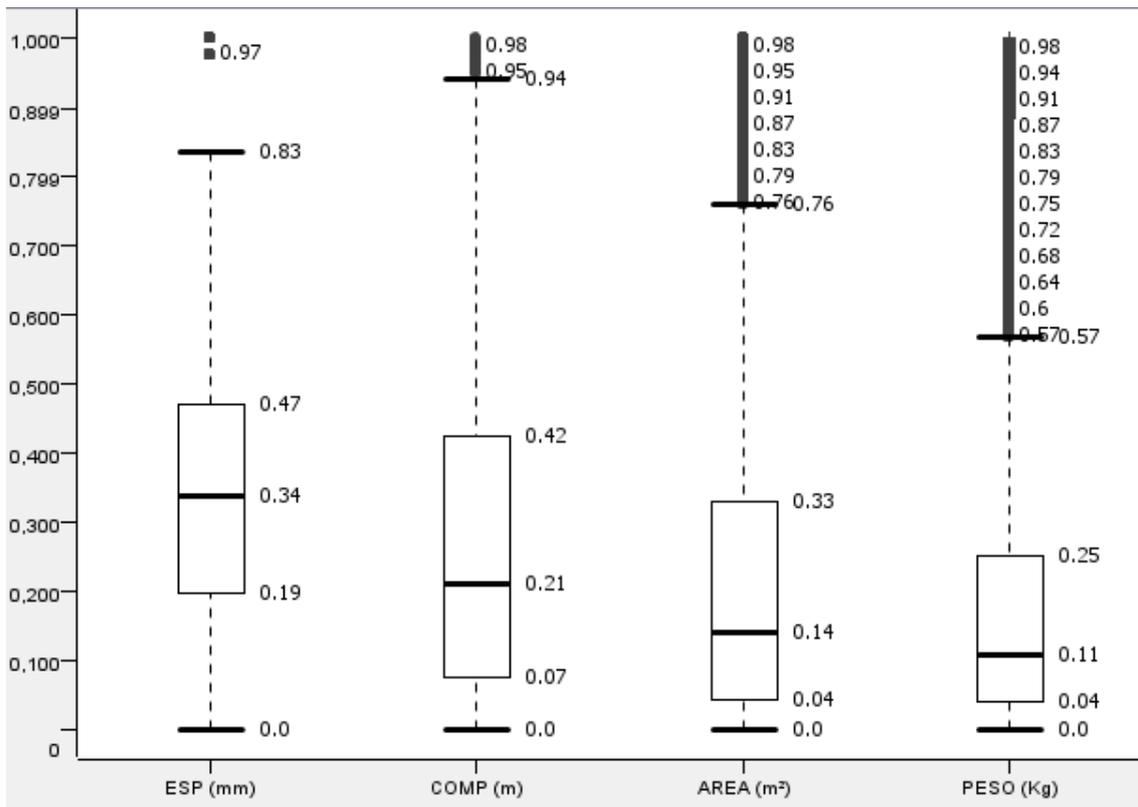


Figura 5.6: Unidade 1 - Box Plot, normalizado entre 0 e 1

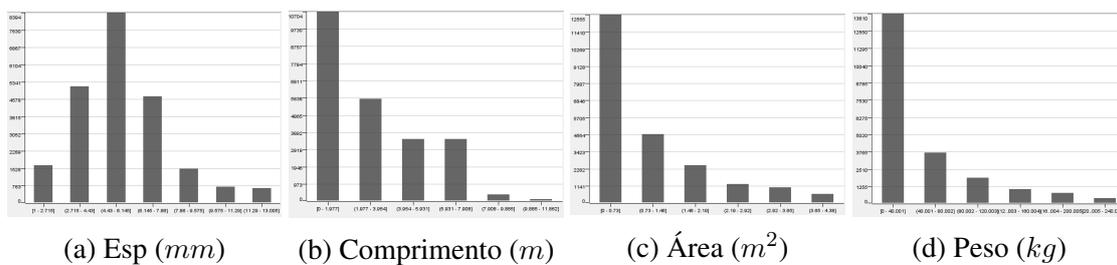


Figura 5.7: Unidade 1 - Histograma

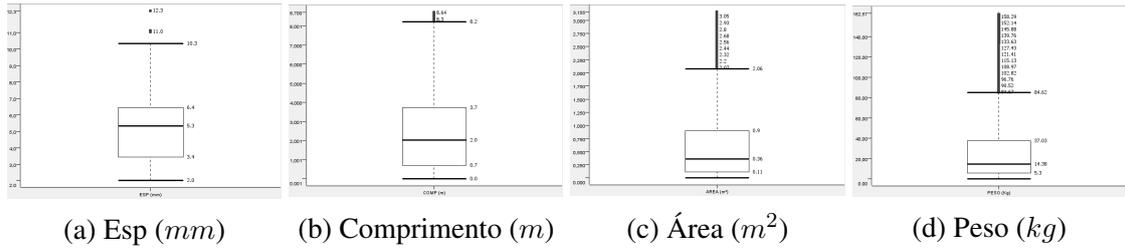


Figura 5.8: Unidade 2 - Box Plot

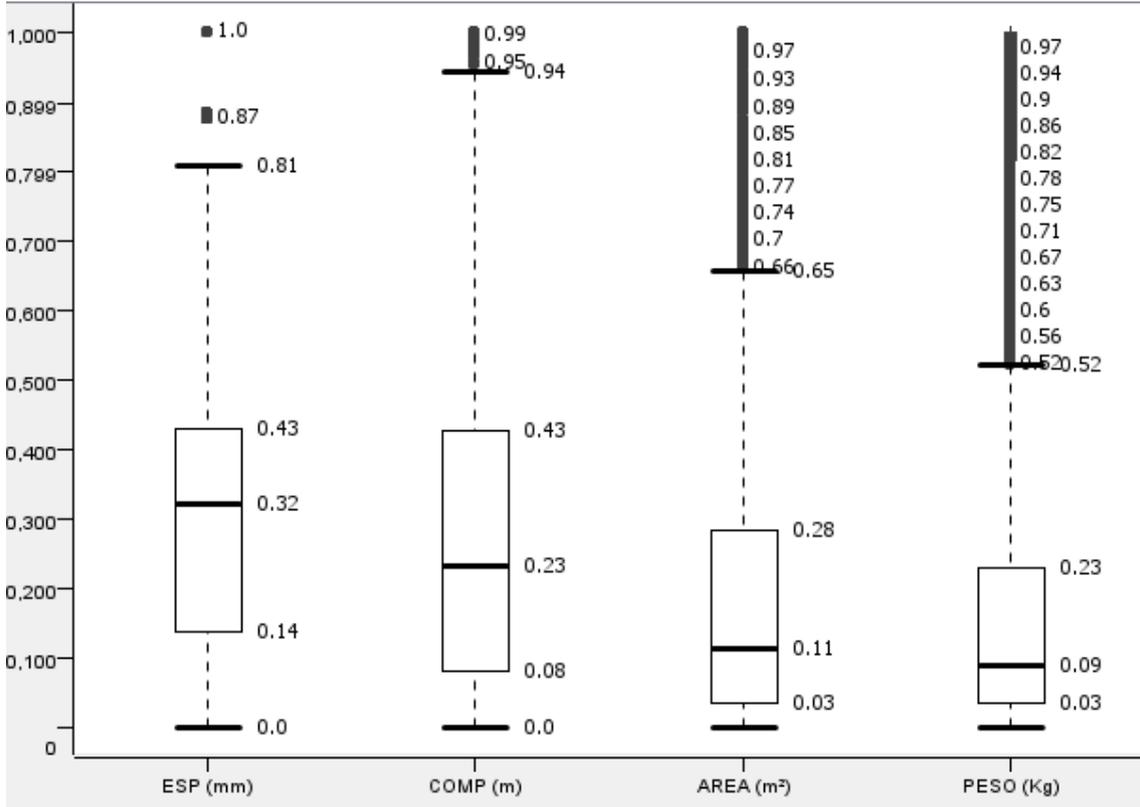


Figura 5.9: Unidade 2 - Box Plot, normalizado entre 0 e 1

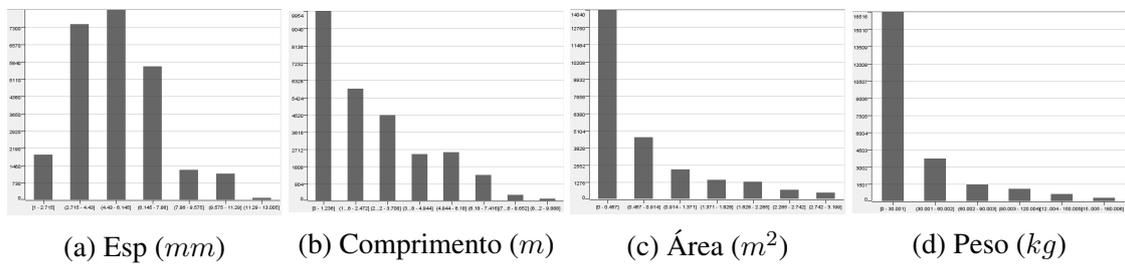


Figura 5.10: Unidade 2 - Histograma

5.2. Complexidade dos FPSOs

Conforme dito no início desta seção, os dados dos projetos foram coletados de duas unidades do tipo FPSO, construídas em estaleiros diferentes no Brasil, e que encontram-se atualmente em operação.

Os dados coletados são referentes a disciplina de tubulação, nas quais temos as diversas características conforme explicitado na seção 4. Além disso, a base de dados apresenta as datas realizadas de cada atividade de fabricação (corte, ajuste, solda, etc.) e montagem (posicionamento, ajuste, solda, etc.) por *spool*. Diante dessas informações, podemos também agregar os dados de *spools* em linhas, módulos ou áreas, seguindo a hierarquia da disciplina de tubulação.

Os indicadores foram calculados seguindo a metodologia apresentada na subseção 4.4.

Considerando o levantamento inicial dos indicadores, podemos verificar os resultados desses indicadores de complexidade separados até os níveis dos módulos, conforme figuras abaixo. Estes gráficos estão representados por uma escala de cores, sendo a escala de cor clara a de menor complexidade observada, enquanto a escala de cor escura a de maior complexidade, conforme destacado na palheta de cores da figura 5.11. A escala de cores foi definida relativamente, ou seja, são comparadas pelos seus respectivos percentis na escala.

Vale ressaltar que esta metodologia e apresentação foi objeto de estudo de vários artigos, sendo utilizados com sucesso em outros tipos de embarcações com o objetivo de representar graficamente os níveis de complexidade para cada área/módulo.



Figura 5.11: Escala de Cores

➤ Unidade 1:

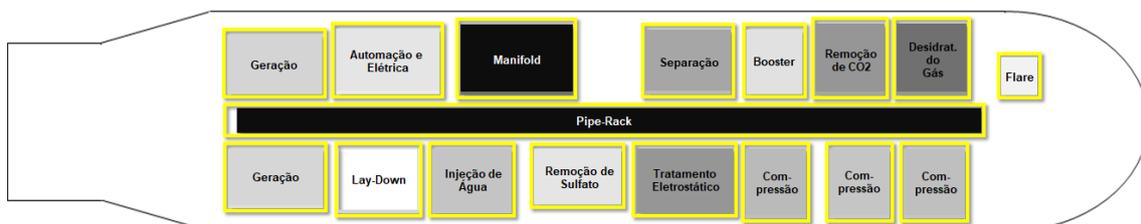


Figura 5.12: Unidade 1 - Complexidade de Montagem (C_{as})

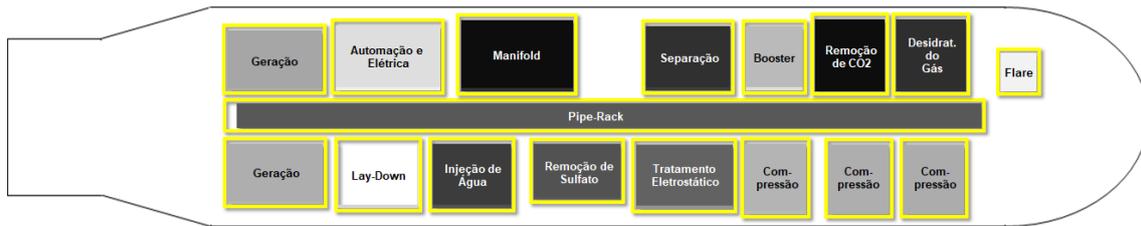


Figura 5.13: Unidade 1 - Complexidade de Material (C_m)

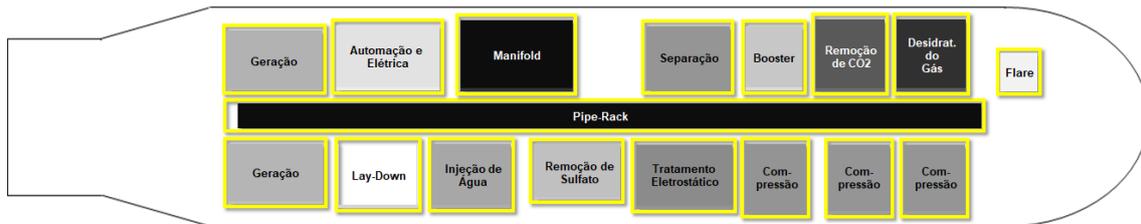


Figura 5.14: Unidade 1 - Complexidade de Forma (C_{sh})

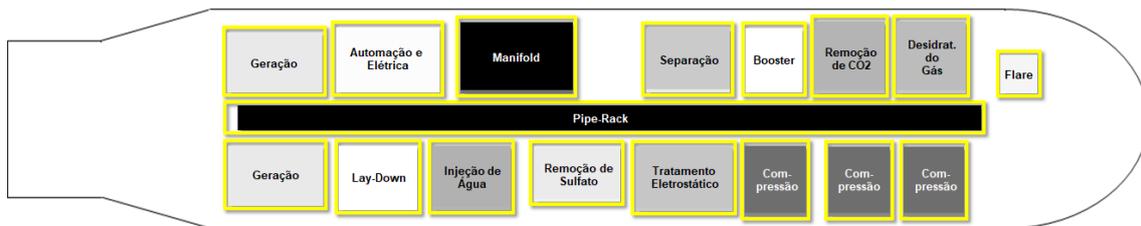


Figura 5.15: Unidade 1 - Complexidade de Solda (C_{solda})

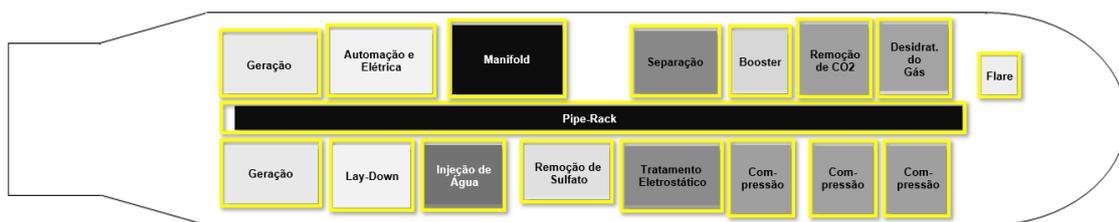


Figura 5.16: Unidade 1 - Complexidade de Densidade (C_d)

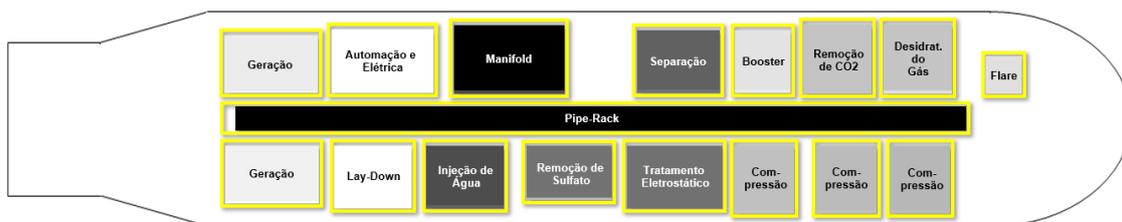


Figura 5.17: Unidade 1 - Complexidade Agregada

➤ **Unidade 2:**

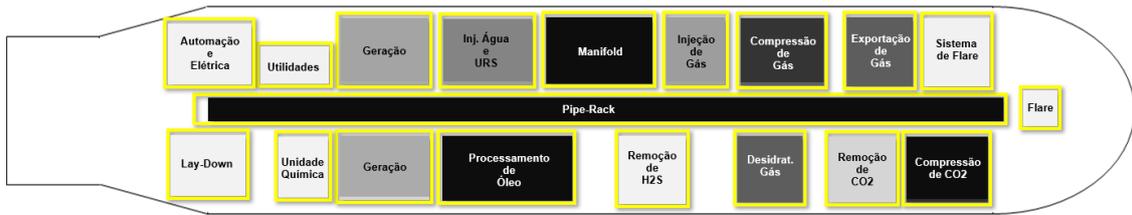


Figura 5.18: Unidade 2 - Complexidade de Montagem (C_{as})

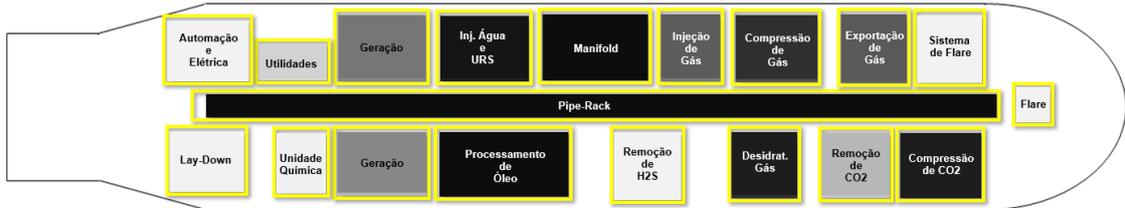


Figura 5.19: Unidade 2 - Complexidade de Material (C_m)

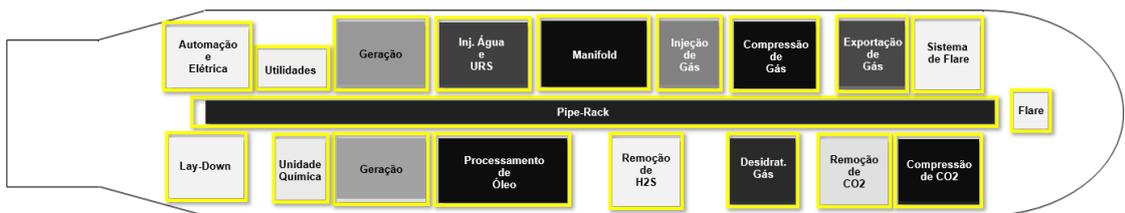


Figura 5.20: Unidade 2 - Complexidade de Forma (C_{sh})

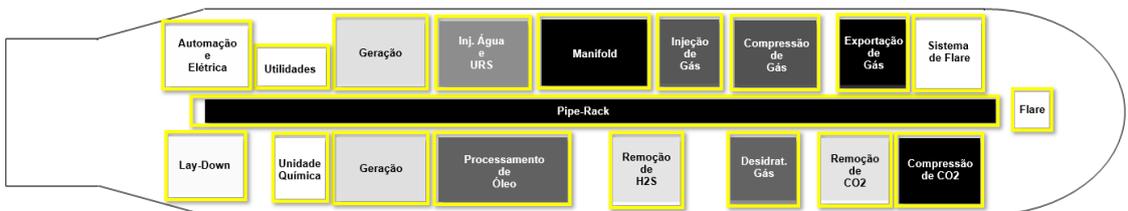


Figura 5.21: Unidade 2 - Complexidade de Solda (C_{solda})

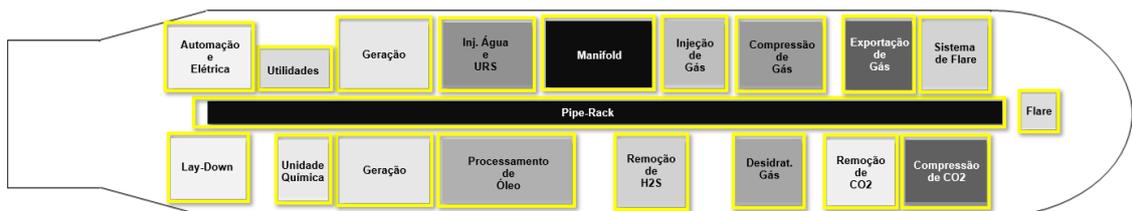


Figura 5.22: Unidade 2 - Complexidade de Densidade (C_d)

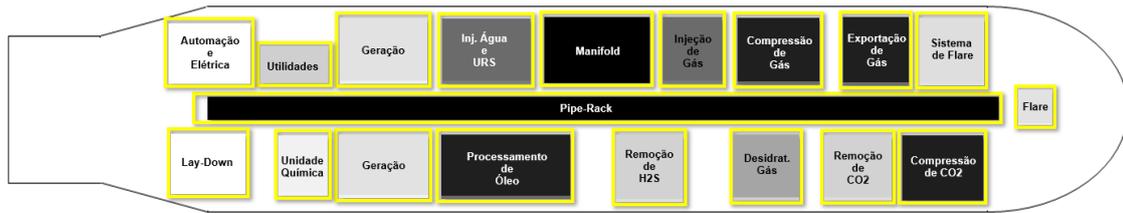


Figura 5.23: Unidade 2 - Complexidade Agregada

Para confirmar os resultados medidos e apresentados graficamente pelas figuras acima, foi realizado uma pesquisa com especialistas com longa e vasta experiência em projetos de unidades de produção do tipo FPSO, questionando a cada especialista a complexidade que eles observam para a realização do projeto, suprimento, construção, montagem, comissionamento, etc. considerando a disciplina de tubulação.

Na dinâmica da pesquisa, os especialistas informaram a complexidade de cada módulo, classificando-os entre complexidade “muito baixa”, “baixa”, “média”, “alta”, “muito alta”. Os resultados dessa pesquisa, separados por cada especialista, podem ser observados na tabela 5.1:

Tabela 5.1: Pesquisa com os Especialistas

MÓDULO	PESQUISA RESULTADO								
	Eng. Eletricista Master	Eng. Mecânico Sênior	Eng. Mecânico Master	Eng. Mecânico Sênior	Eng. Mecânico Sênior	Eng. Civil Master	Eng. Eletricista Master	Eng. Mecânico Master	Eng. Produção Sênior
Automation and Electrical	muito baixa	baixa	muito baixa	baixa	muito baixa	baixa	muito baixa	baixa	baixa
Booster Compression	média	média	média	média	baixa	média	média	baixa	baixa
Chemical Unit and Products Storage	média	média	baixa	muito baixa	média	média	baixa	baixa	baixa
CO2 Compression	média	muito alta	média	média	muito alta	muito alta	média	muito alta	muito alta
CO2 Removal	baixa	média	média	baixa	média	baixa	baixa	baixa	baixa
Exportation Gas Compression	alta	muito alta	alta	muito alta	alta	alta	alta	muito alta	muito alta
Flare Systems	média	média	média	alta	média	média	alta	alta	alta
Flare Tower	média	média	média	média	alta	média	média	alta	alta
Gas Dehydration System and Fuel Gas	alta	média	média	alta	média	alta	alta	alta	alta
Gas Injection	alta	muito alta	alta	alta	muito alta	alta	alta	alta	muito alta
H2S Removal System	média	alta	média	média	alta	alta	média	alta	alta
Laydown Area	muito baixa	baixa	muito baixa	baixa	muito baixa	baixa	muito baixa	baixa	muito baixa
Main Gas Compression	alta	alta	alta	alta	média	média	alta	alta	alta
Oil Processing	média	alta	alta	alta	média	alta	alta	alta	média
Oil Processing - Electrostatic Treatment	média	média	alta	alta	alta	alta	alta	alta	média
Pig Launchers/Receivers & Production and Injection Manifolds	muito alta	muito alta	alta	muito alta	alta	muito alta	muito alta	alta	alta
Pipe-Rack	alta	alta	média	média	alta	média	alta	alta	média
Power Generation	baixa	baixa	baixa	baixa	média	média	baixa	média	média
Sulphate Removal	baixa	alta	média	baixa	média	média	média	alta	média
Utilities	alta	alta	média	alta	média	média	alta	alta	alta
Water Injection	alta	alta	média	alta	alta	alta	alta	alta	alta

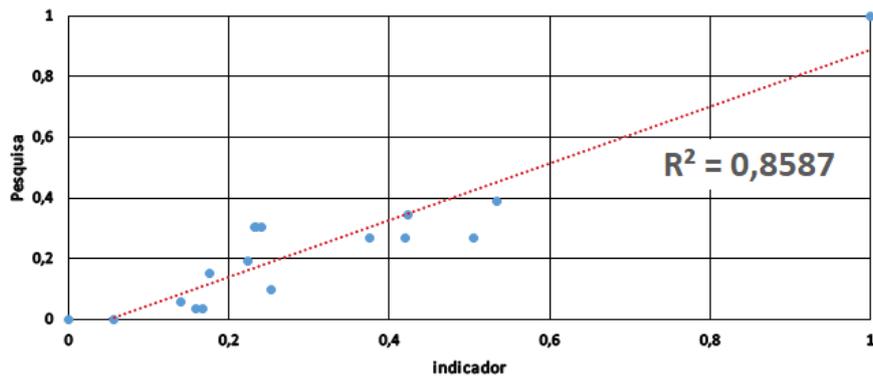
Os resultados qualitativos apresentados na tabela 5.1 foram transformados em resultados quantitativos através de uma função polinomial de grau 6 e parâmetros iguais a 1, conforme apresentado na equação 5.1.

$$f(x) = x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x \quad (5.1)$$

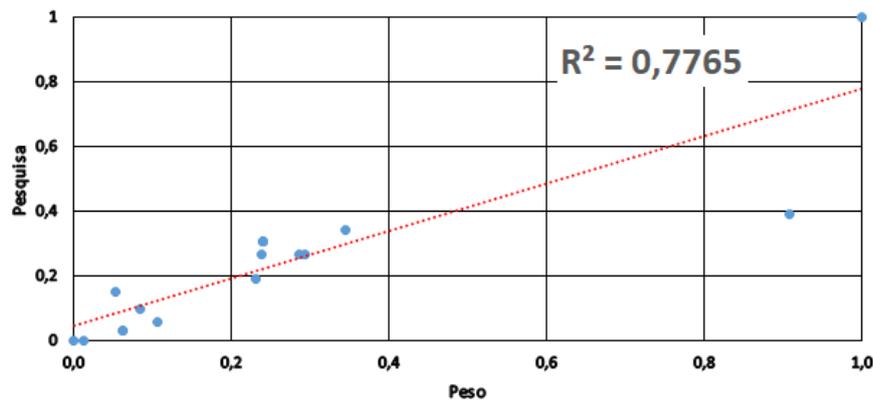
Além disso, foram atribuídos valores sequenciais para cada classificação, sendo “muito baixa = 1”, “baixa = 2”, “média = 3”, “alta = 4”, “muito alta = 5”. Após esta

etapa, foi feito o somatório dos resultados de cada módulo, realizando-se a normalização dos dados entre 0 e 1. Dessa forma, é possível fazer o comparativo entre os valores dos indicadores de complexidade levantados com a visão dos especialistas. Adicionalmente, foi incluído um comparativo entre peso de cada módulo e o resultado da pesquisa, para que pudéssemos observar a correlação entre essas duas variáveis.

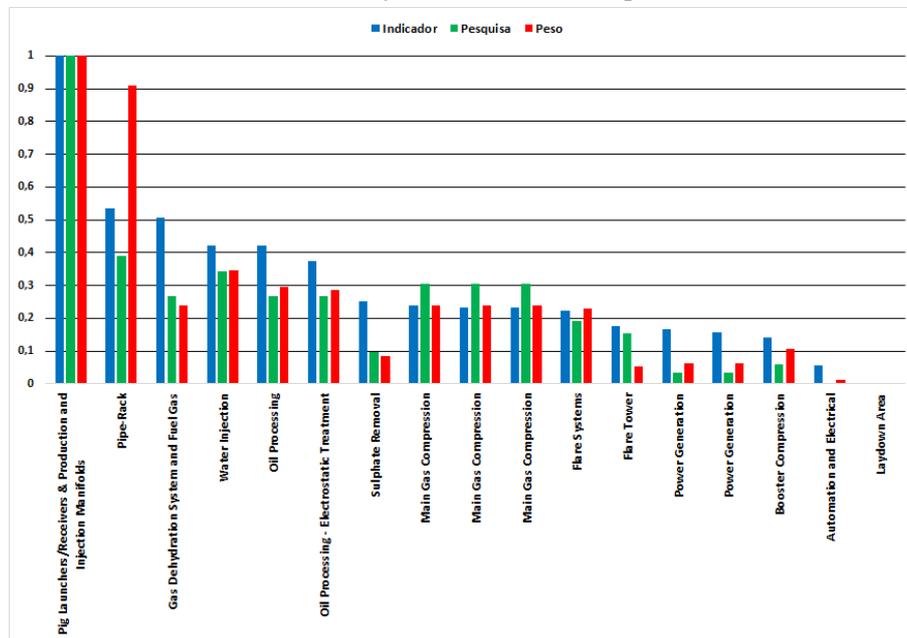
Os resultados comparativos podem ser observados nas figuras 5.24 e 5.25 abaixo:



(a) Correlação entre Indicador e Pesquisa

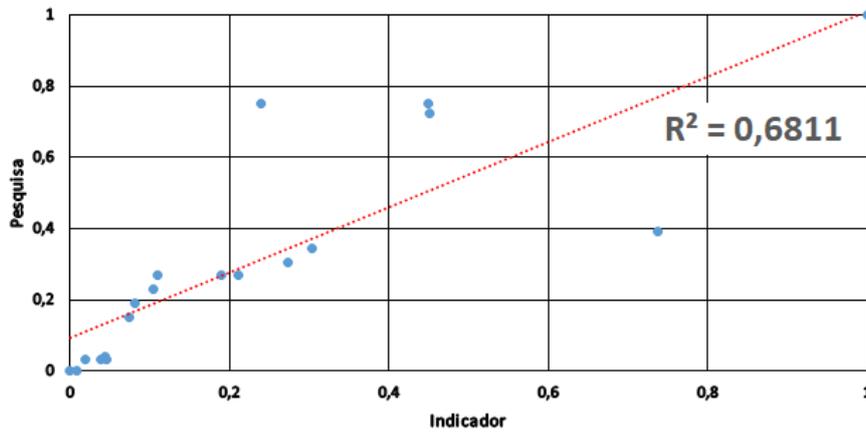


(b) Correlação entre Peso e Pesquisa

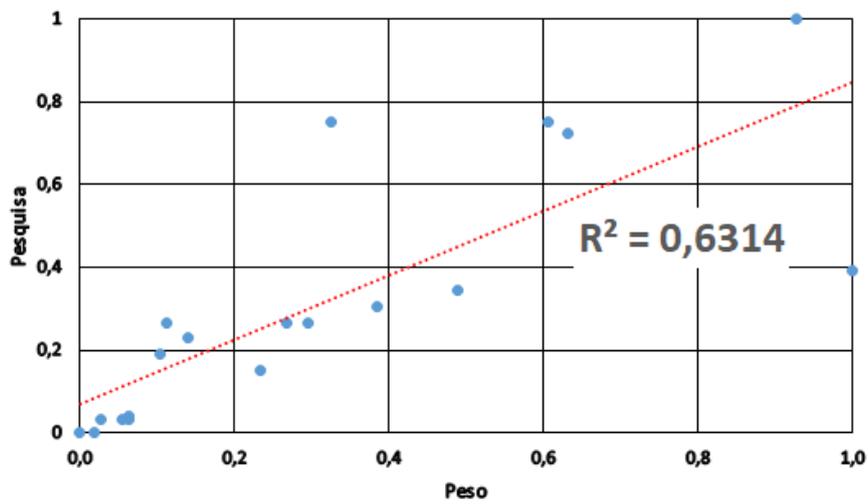


(c) Comparativo

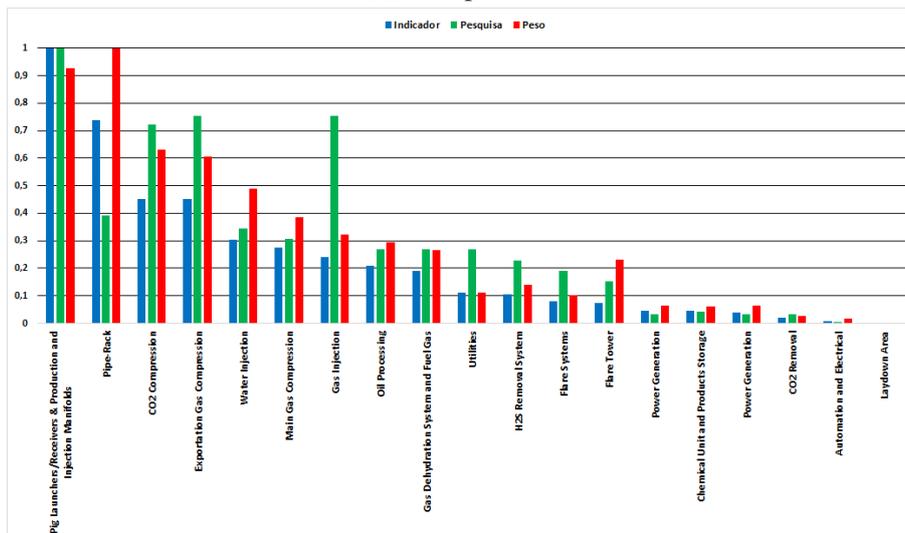
Figura 5.24: Unidade 1 - Relação entre Indicador, Peso e Pesquisa



(a) Correlação



(b) Comparativo



(c) Comparativo

Figura 5.25: Unidade 2 - Relação entre Indicador, Peso e Pesquisa

5.3. Análise das Correlações

Um dos objetivos deste estudo é comparar as relações entre os indicadores de complexidade calculados e as datas realizadas de fabricação e montagem das tubulações, permitindo a verificação de correlação (linear, exponencial, etc.) entre as variáveis.

Para fazer a análise dos dados e apresentar suas respectivas correlações, foi utilizado o *software* KNIME (*Konstanz Information Miner*), versão 4.0.1. Este *software* é uma plataforma de análise de dados, relatórios e integração. O KNIME integra vários componentes para aprendizado de máquina e mineração de dados por meio de seu conceito modular de *pipelining* e fluxo de dados. Segue o conceito *open-source* (código aberto) e, por isso, pode ser adquirido gratuitamente.

No nível de hierarquia de “*spool*”, podemos calcular os indicadores de complexidade de forma (C_{sh}) e solda (C_{solda}), normalizadas entre 0 e 1, para ambas unidades (unidade 1 e 2). Esta comparação representa o valor calculado do indicador (eixo das abscissas (x)), normalizada entre 0 e 1, em relação ao tempo de total de fabricação e montagem do *spool* (eixo das ordenadas (y)). Para facilitar a visualização, as unidades serão agregadas graficamente, sendo a unidade 1 representada pela cor verde e a unidade 2 representada pela cor vermelha. Além disso, será utilizado o recurso matricial para esta representação gráfica onde também podemos comparar a correlação entre os indicadores:

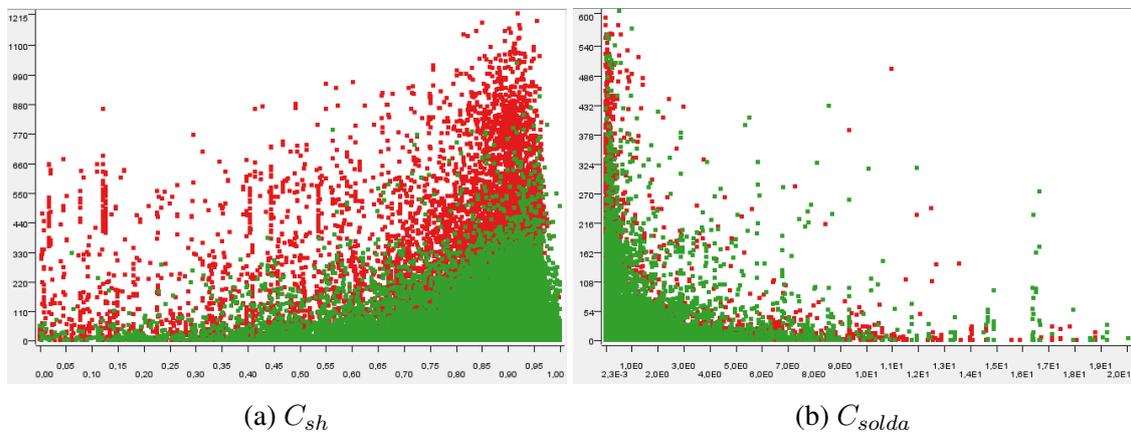


Figura 5.26: Unidade 1 e 2 (*spool*) - Correlação (C_{sh} , C_{solda})

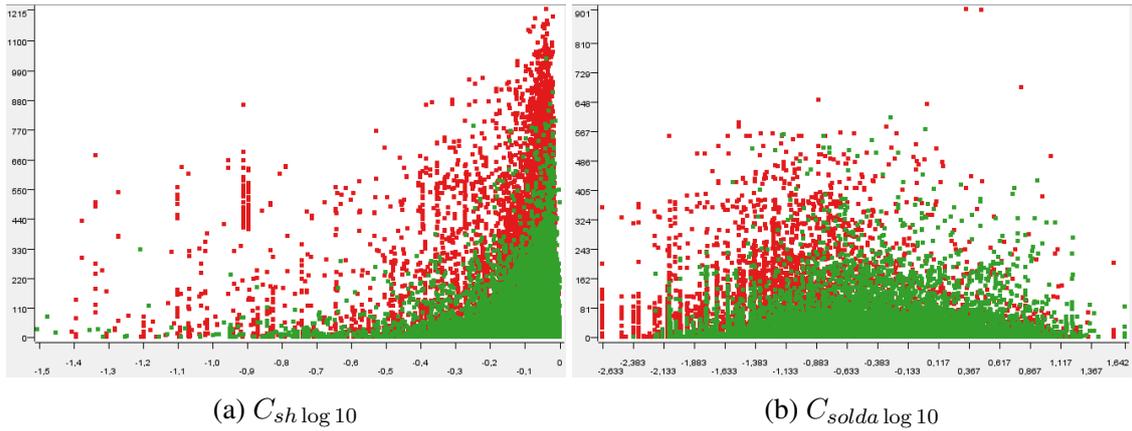


Figura 5.27: Unidade 1 e 2 (spool) - Correlação (C_{sh} , C_{solda} , base log10)

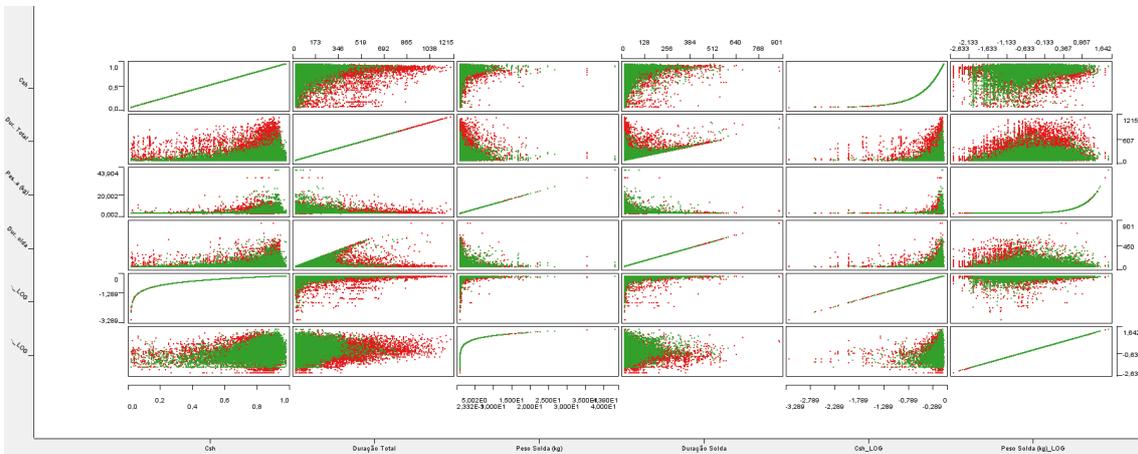


Figura 5.28: Unidade 1 e 2 (spool) - Correlação Matricial

No nível de hierarquia de “linha”, podemos calcular os indicadores de complexidade de forma (C_{sh}), montagem (C_{as}), material (C_m) e solda (C_{solda}), normalizadas entre 0 e 1, para ambas unidades (unidade 1 e 2). Esta comparação representa o valor calculado do indicador (eixo das abscissas (x)) em relação ao tempo de total de fabricação e montagem da linha (eixo das ordenadas (y)). Para facilitar a visualização, as unidades serão agregadas graficamente, sendo a unidade 1 representada pela cor verde e a unidade 2 representada pela cor vermelha. Além disso, será utilizado o recurso matricial para esta representação gráfica onde também podemos comparar a correlação entre os indicadores:

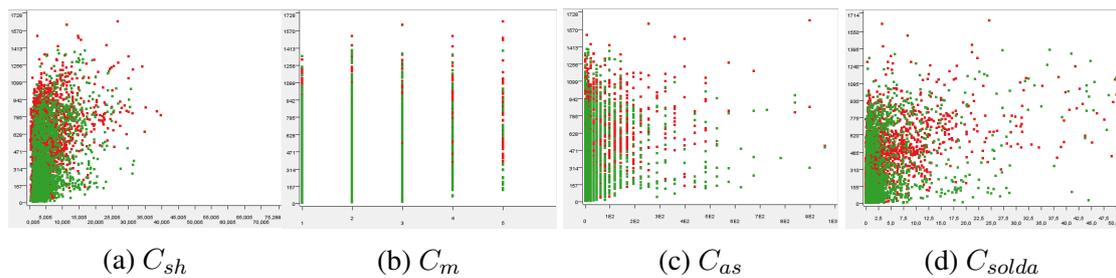


Figura 5.29: Unidade 1 e 2 (linha) - Correlação (C_{sh} , C_m , C_{as} , C_{solda})

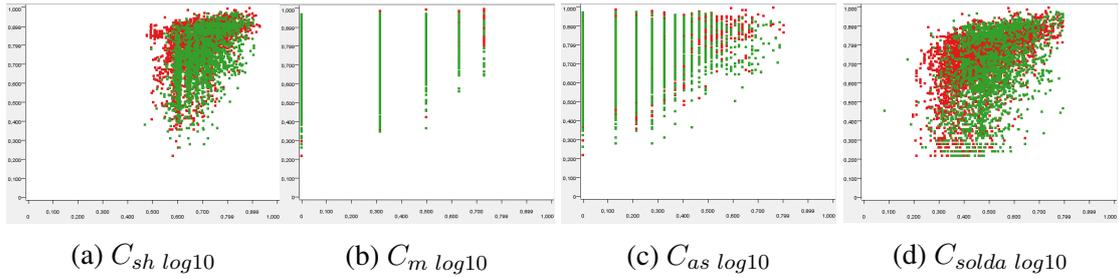


Figura 5.30: Unidade 1 e 2 (linha) - Correlação (C_{sh} , C_m , C_{as} , C_{solda} , base log10)

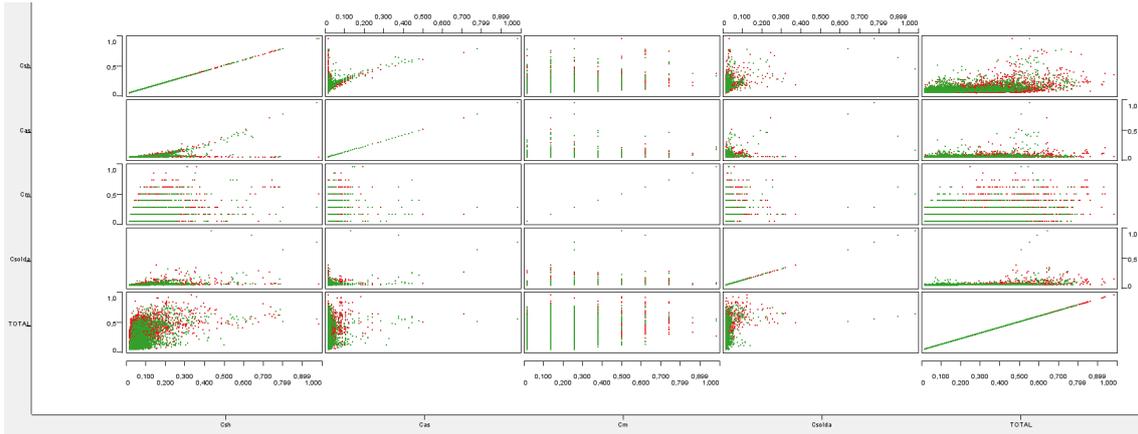


Figura 5.31: Unidade 1 e 2 (linha) - Correlação Matricial

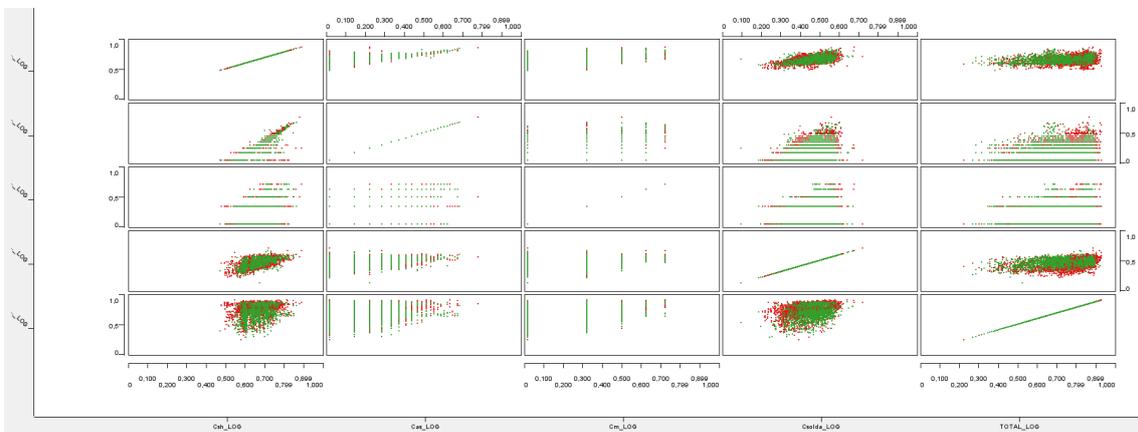


Figura 5.32: Unidade 1 e 2 (linha) - Correlação Matricial, base log10)

No nível de hierarquia de “módulo”, podemos calcular os indicadores de complexidade de forma (C_{sh}), montagem (C_{as}), material (C_m), solda (C_{solda}) e densidade (C_d), normalizadas entre 0 e 1, para ambas unidades (unidade 1 e 2). Esta comparação representa o valor calculado do indicador (eixo das abscissas (x)) em relação ao tempo de total de fabricação e montagem da linha (eixo das ordenadas (y)). Para facilitar a visualização, as unidades serão agregadas graficamente, sendo a unidade 1 representada pela cor verde

e a unidade 2 representada pela cor vermelha. Além disso, será utilizado o recurso matricial para esta representação gráfica onde também podemos comparar a correlação entre os indicadores:

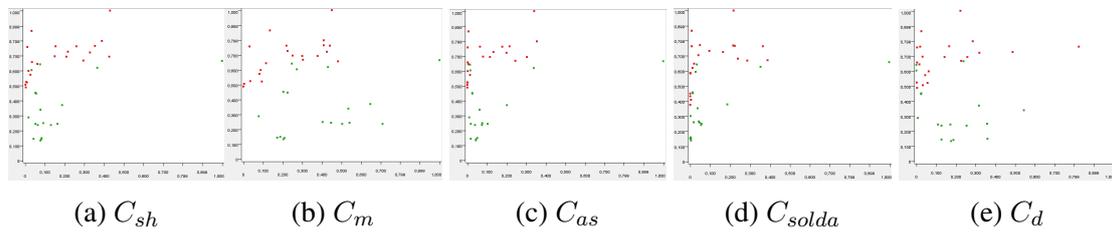


Figura 5.33: Unidade 1 e 2 (linha) - Correlação (C_{sh} , C_m , C_{as} , C_{solda} , C_d)

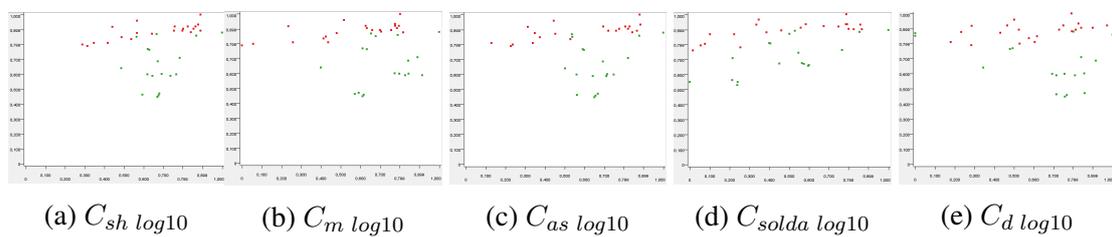


Figura 5.34: Unidade 1 e 2 (linha) - Correlação (C_{sh} , C_m , C_{as} , C_{solda} , C_d , base log10)

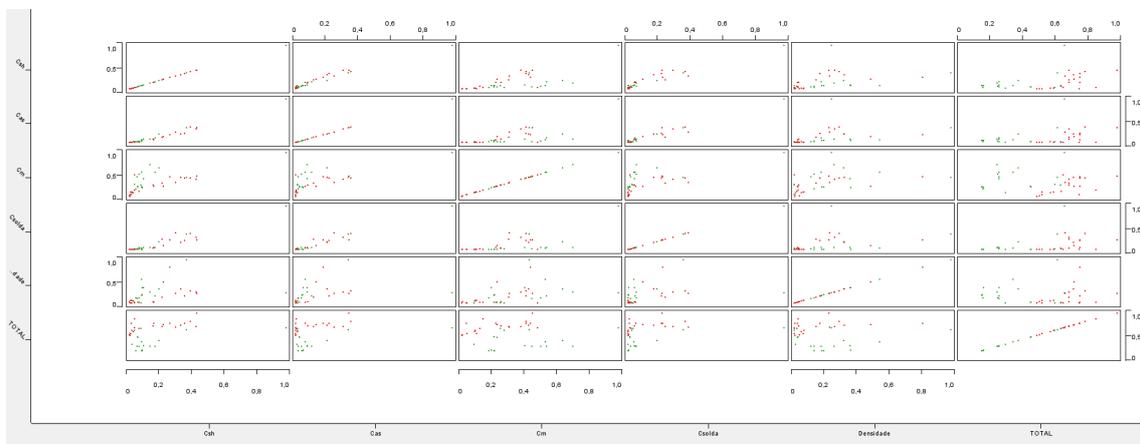


Figura 5.35: Unidade 1 e 2 (módulo) - Correlação Matricial

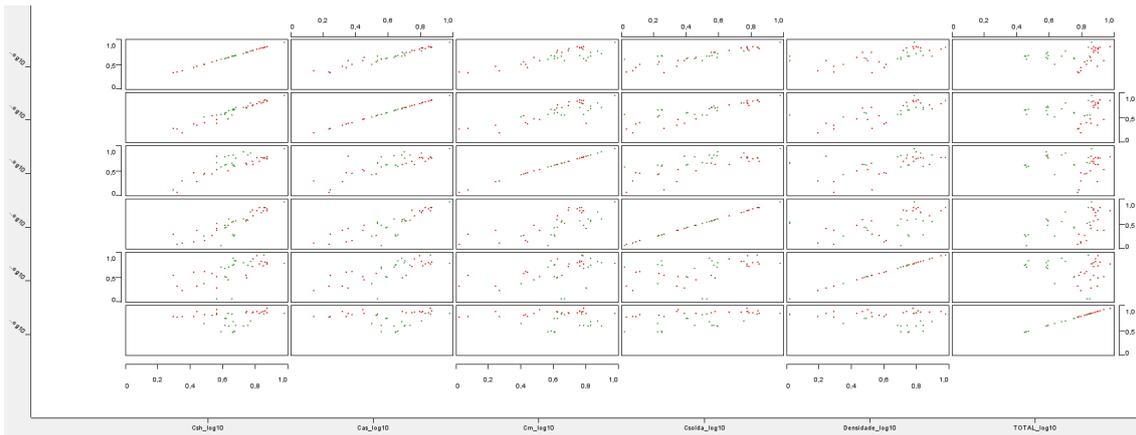


Figura 5.36: Unidade 1 e 2 (módulo) - Correlação Matricial, base log10

Neste comparativo, podemos avançar na análise da correlação entre os indicadores de complexidade levantados. Para isso, utilizaremos o recurso do PCA (*Principal Component Analysis*). O PCA é um procedimento estatístico que utiliza uma transformação ortogonal para converter um conjunto de observações de variáveis possivelmente correlacionadas em um conjunto de valores de variáveis linearmente não correlacionadas chamadas de componentes principais. O número de componentes principais é sempre menor ou igual ao número de variáveis originais.

Após implementar o algoritmo do PCA com a utilização do *software* Knime, encontramos os seguintes resultados:

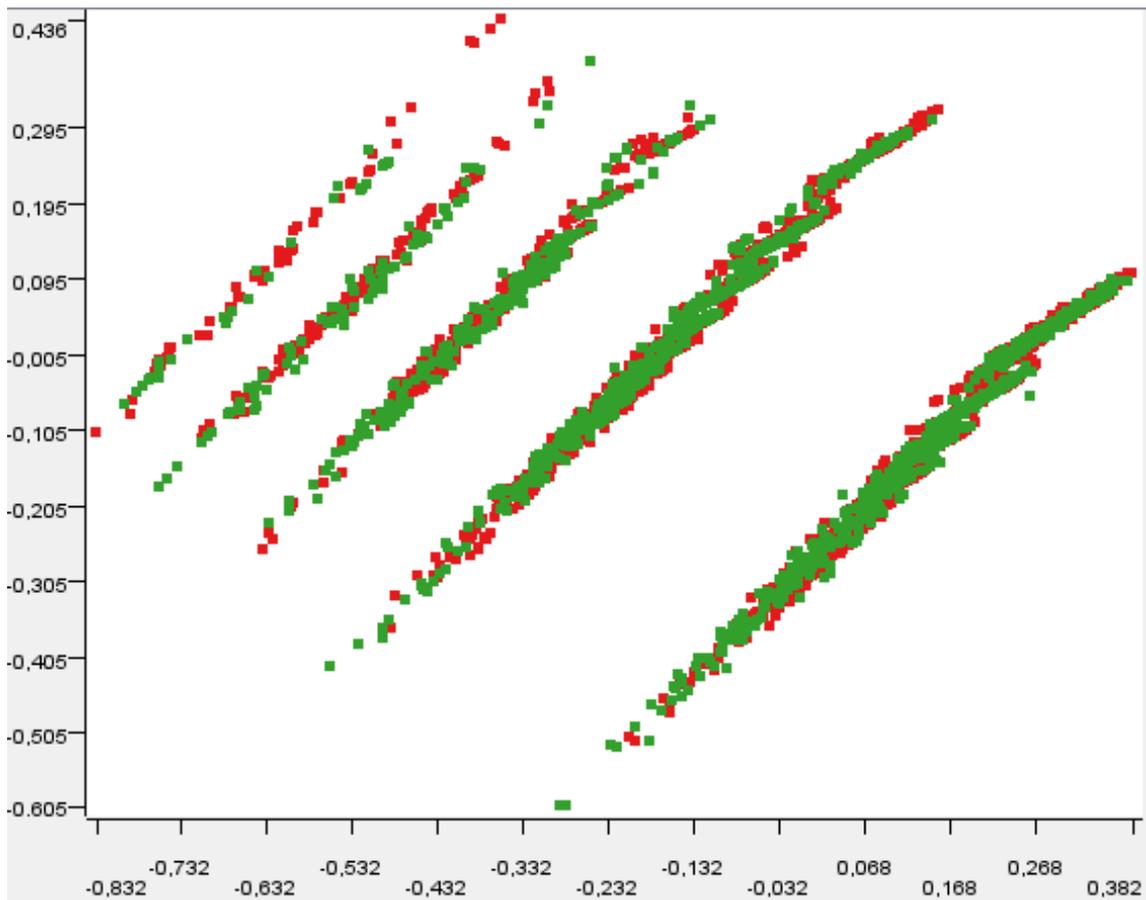


Figura 5.37: Resultado do PCA

O gráfico apresentado acima na figura 5.37 mostra os quatro indicadores de complexidade (forma (C_{sh}), montagem (C_{as}), material (C_m) e solda (C_{solda}), todos na base \log_{10}), transformados linearmente em duas dimensões, de acordo com a método PCA. Podemos observar a formação de *clusters*, divididos em 5 subgrupos de indicadores de complexidade fortemente correlacionados entre si.

Com o objetivo de apresentar um modelo que pudesse prever as durações de fabricação e montagem de cada linha, a partir dos indicadores de complexidade levantados, foram realizados testes utilizando-se algoritmos conhecidos na literatura de *machine learning*, entre eles, o modelo de Árvore de Decisão (*Decision Tree*), Rede Neural Probabilística ou PNN (*Probabilistic Neural Network*) e máquina de vetores de suporte ou SVM (*Support Vector Machine*).

Após a realização dos testes de cada um dos modelos mencionados acima, podemos destacar que a Árvore de Decisão foi aquele que apresentou o melhor resultado com uma acurácia (correlação) de 60%. Árvore de decisão são métodos de aprendizado de máquina supervisionado não-paramétricos, muito utilizados em tarefas de classificação e regressão. O propósito da árvore de decisão é fazer diversas divisões dos dados em subconjuntos, de tal forma que os subconjuntos vão ficando cada vez mais puros (*Gini impurity*). Um subconjunto dos dados será mais puro na medida em que contém menos classes

(ou apenas uma) da variável *target*, que indica a ocorrência ou não de um evento. A entropia é uma forma de medir a pureza de cada subconjunto de uma árvore de decisão, ou seja, é uma forma de medir a probabilidade de obter um elemento positivo (ocorrência do evento) a partir de uma seleção aleatória do subconjunto de dados. Os modelos de árvores de decisão são frequentemente utilizados por motivos como: facilidade de compreensão dos resultados, requerem um mínimo de preparação, novas opções podem ser adicionadas, além de serem facilmente convertidos em decisões práticas.

Na figura 5.38 abaixo, podemos apresentar os resultados do teste do método de árvore de decisão para o estudo de caso apresentado até o quarto nível para facilitar a visualização. Vale destacar que os dados foram subdivididos em 5 conjuntos (bin 1, bin 2, bin 3, bin 4 e bin 5), com o objetivo de agrupar os dados numéricos em intervalos, chamados aqui de *bin*.

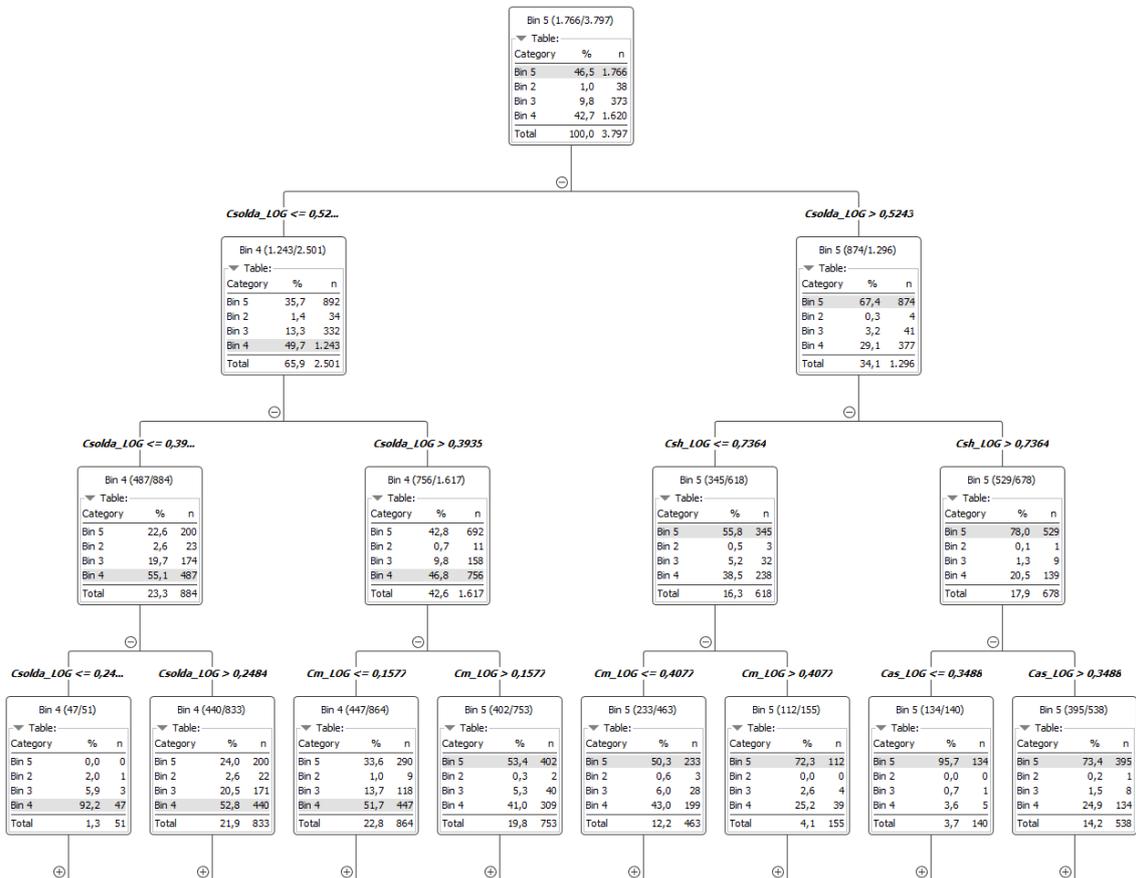


Figura 5.38: Resultado Árvore de Decisão

Capítulo 6

ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1. Resultado da Pesquisa

Podemos verificar que o resultado obtido com as análises dos especialistas apresentaram informações relevantes. No comparativo entre o resultado da pesquisa com os indicadores de complexidade, observa-se uma melhor correlação linear para ambas unidades quando comparados com a correlação linear medida pelo peso. Combinando as três variáveis (indicador de complexidade, peso e pesquisa) em um gráfico de barras, é possível observar uma maior aderência dos indicadores de complexidade em relação a análise dos especialistas.

Pode-se verificar também que existem “pontos fora da curva”, ou seja, não estão perfeitamente alinhadas com a linha de tendência, isso é facilmente explicado pela particularidade de cada unidade, podendo o mesmo sistema ter complexidades diferentes em cada FPSO. Como exemplo, podemos citar sistema principal de compressão de gás que possui uma avaliação geral, na visão dos especialistas, como “alta complexidade”. Porém, em uma determinada unidade, como no caso da unidade 1, este sistema está melhor distribuído pelos 3 módulos de compressão. No caso da unidade 2, o sistema principal de compressão de gás está concentrado em um único módulo. Assim, o indicador de complexidade medirá pelas características da disciplina de tubulação contidas naquele módulo, sem juízo de valor da complexidade do sistema a qual representa.

Outro fator a ser observado é em relação ao projeto que cada unidade possui. Determinados sistemas, como no caso da desidratação de gás, podem ser utilizados diferentes tecnologias como solução de processo (ex.: TEG ou Peneira Molecular). Assim, as unidades podem possuir particularidades, a depender das tecnologias aplicadas, que exercem influencia sobre os resultados medidos nos indicadores de complexidades e a visão dos especialistas, podendo alterar o resultado final.

6.2. Resultado das Correlações

A partir dos gráficos apresentados na seção 5.3, podemos destacar os seguintes pontos para análise:

- A correlação no nível de “*spool*”, apresentadas na figura 5.27, revelam uma fraca correlação com característica exponencial para o indicador de complexidade de forma (C_{sh}).
- A correlação no nível de “linha” (base log10), apresentada na figura 5.32, revelam uma fraca correlação com característica linear para os indicadores de complexidade de forma (C_{sh}) e solda (C_{solda}).
- A correlação no nível de “módulo”, apresentadas nas figuras 5.35 e 5.36, revelam uma correlação média com característica linear para os indicadores de complexidade de forma (C_{sh}), montagem (C_{as}), material (C_m), solda (C_{solda}) e densidade (C_d) para a unidade 2.
- O método de Árvore de Decisão foi o método que apresentou o melhor resultado para predição das atividades com uma acurácia (correlação) de 60%.

6.3. Limitações do Estudo

Vale mencionar que as durações das atividades de fabricação e montagem de tubulação de um projeto de grande complexidade como estes podem ser influenciados e limitados por diversos fatores que, de certa forma, interferem nos resultados que pretendíamos demonstrar, a saber:

- As durações das atividades foram calculadas através da diferença entre a atividade presente com a atividade subsequente. No entanto, há casos em que um determinado *spool* pode não seguir imediatamente para a atividade subsequente por não ter sido planejada na programação, ou por aquele *spool* não ser a prioridade, ou ainda por falta de material ou mão de obra para aquela atividade. Dessa forma, podemos verificar que a produção de fabricação e montagem dos *spools* possuem uma típica característica de produção “puxada” pela atividade subsequente, enquanto que para uma melhor aferição da duração das atividades seria através de uma produção com característica “empurrada” desde seu início na linha de produção até sua conclusão.
- Normalmente em contratos de fabricação e montagem, a contratada é remunerada pelo “peso” dos tubos processados em um determinado período. Sendo assim, a contratada é constantemente atraída a realizar a fabricação e montagem das tubulações com maior peso (*kg*), pois, dessa forma, poderão ser melhor remuneradas.

Muito embora podemos verificar que o peso das tubulações não deve ser o fator preponderante para remuneração da empresa contratada em detrimento da remuneração pela complexidade da atividade. Conforme pode ser verificado neste estudo, a complexidade de fabricação e montagem de um *spool* deve ser avaliado por suas características como material, desenho, arranjo, etc. e não apenas pelo peso.

- Em projetos de grande complexidade como estes, podemos também destacar a dificuldade de gerenciamento de toda a gama de atividades que deve ser realizada para a conclusão de uma FPSO. A disciplina de tubulação é uma das atividades que demandam uma quantidade elevada de mão de obra direta, para realização das atividades de corte, ajuste, solda, etc., e mão de obra indireta, para realização do planejamento e sequenciamento da fabricação e montagem dos *spools*, sempre observando a necessidade de relacionamento entre prioridade, desenho, material e mão de obra.
- Ainda dentro do gerenciamento dessas atividades, podemos observar a quantidade elevada de *spools* a serem controlados em um projeto de grande porte, sendo que podemos somar a isso, as dezenas de atividades que cada *spool* deve percorrer para sua definitiva montagem e pronta para operação. Com o grande volume de controle podemos identificar algumas falhas e faltas de registros de datas em determinadas atividades. Dessa forma, o resultado final pode ter sido influenciado pela imperfeição nos registros das atividades de fabricação e montagem dos *spools*.

Capítulo 7

CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

Na literatura que pudemos trazer para esse estudo, a complexidade revela-se um problema em engenharia e deve ser minimizada sempre que possível, com o objetivo claro de redução de, principalmente, prazo e custo. Normalmente, a complexidade está associada ao excesso de componentes e suas interconexões entre si. Assim, um projeto otimizado que propõe e comprova um método eficiente de redução de complexidade torna-se benéfico para problemas de engenharia.

A análise de complexidade mostra-se vantajosa sob diversos aspectos. Destaca-se o modo com que, através dela, projetistas podem obter diversas informações de projeto e, através dos indicadores de complexidades medidos, simplificar as estratégias de projeto de engenharia, suprimento, construção, fabricação e montagem, otimizando seu projeto.

Este estudo teve como objetivo realizar um aprofundamento do modelo existente elaborado por Caprace para atender à indústria *offshore* de construção e montagem de unidades de produção do tipo FPSO. Para isso, além dos indicadores apresentados por Caprace, como complexidade de forma (C_{sh}), montagem (C_{as}), material (C_m), foram introduzidos outros indicadores como complexidade de solda (C_{solda}) e densidade (C_d), sendo todos eles calculados utilizando-se de recursos matemáticos e geométricos adaptados à disciplina de tubulação, no intuito de obter um valor racional comparativo para cada indicador.

Os indicadores foram levantados a partir de dados obtidos de duas unidades de produção do tipo FPSO, construídas em estaleiros brasileiros diferentes, de forma a aplicar pioneiramente o modelo. Vale ressaltar que para este estudo foram considerados os sistemas de *topside* de cada plataforma para aferição dos indicadores.

Através de aplicação do modelo e cálculo dos indicadores de complexidade, planejou-se aferir a correlação entre os indicadores de complexidade e as durações realizadas das atividades de fabricação e montagem das tubulações. O objetivo é observar os resultados gerados são compatíveis com o comportamento real da fabricação e montagem de tubulação.

O estudo de caso apresentado demonstra o potencial do modelo, tanto em relação à capacidade de geração de informações de complexidade em tubulações, considerando seus diversos níveis (*spools*, linhas e módulos de uma FPSO), como para realização de análises detalhadas de projeto para redução das complexidades, podendo, assim, ser utilizada para a tomada de ações que otimizem a estratégia de construção e montagem.

O modelo de proposto provou-se viável a partir dos resultados obtidos com a análise dos especialistas em construção e montagem de FPSO. Os resultados finais indicam que conclusões relevantes podem ser alcançadas com o modelo de análise de complexidade, ao invés de concepção atual de peso *versus* produtividade histórica. Portanto, o modelo de complexidade é altamente recomendado para ser aplicado com sucesso na indústria *offshore*.

Importante ressaltar que para melhor desenvolvimento do modelo proposto, faz-se necessário diversos ajustes gerenciais e culturais na condução de projetos de engenharia de grande porte. As partes envolvidas (*stakeholders*) devem investir maiores recursos e capacidades nas atividades de controle e registro dos dados, para que todas as informações possam representar as condições reais observadas na prática. Outro importante fator, é buscar melhorar as cláusulas contratuais que remunerem a contratada pelo efetivo esforço desempenhado. O modelo de análise de complexidade revela-se uma excelente alternativa de como remunerar as contratadas a partir dos esforços a serem desempenhados para cada atividade, em vez de apenas uma característica que pode influenciar um sequenciamento desorganizado e ineficiente das atividades. Todos esses fatores são de fundamental relevância para que o estudo não sofra as limitações observadas aqui.

Para futuros estudos, podemos aplicar o modelo para todos os módulos e áreas de uma FPSO (não somente *topside* como realizado neste estudo), abordando projetos de tamanhos variados. Além disso, podemos introduzir novos indicadores de complexidade como, por exemplo, o indicador de *acessibilidade* para determinar a localização de cada *spool* no eixo espacial da plataforma. Com isso, poderemos definir a complexidade na montagem de um *spool*, a partir da necessidade de montagem de andaimes ou outras dificuldades de acesso e densidade (destaca-se que não foi possível aferir este indicador neste estudo devido a dificuldade de digitalização dos desenhos de engenharia com os dados necessários para realizar este tipo de levantamento).

Além disso, os indicadores de complexidade podem ser aferidos não somente para construção e montagem da FPSO. Podem, também, ser implementados para as atividades de operação e manutenção, indicando os desafios necessários para cada sistema da unidade de produção.

Portanto, podemos verificar um grande potencial na análise da complexidade para unidades de produção do tipo FPSO. Esse estudo demonstra uma capacidade elevada de solução aos problemas de engenharia.

Referências Bibliográficas

- [1] SAMY, S., ELMARAGHY, H. “A model for measuring products assembly complexity”, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, v. 23, n. 11, pp. 1015–1027, 2010.
- [2] KOHL, K. “A Quiet Oil Boom Rages”, *Energy and Capital*, Jan 2014. Disponível em: <<https://www.energyandcapital.com/articles/offshore-oil-boom/4193>>.
- [3] NKADO, R. N. “Construction time-influencing factors: the contractor’s perspective”, *Construction Management and Economics*, v. 13, n. 1, pp. 81–89, 1995.
- [4] TATIKONDA, M. V., ROSENTHAL, S. R. “Technology novelty, project complexity, and product development project execution success: a deeper look at task uncertainty in product innovation”, *IEEE Transactions on engineering management*, v. 47, n. 1, pp. 74–87, 2000.
- [5] AUSTIN, S., NEWTON, A., STEELE, J., et al. “Modelling and managing project complexity”, *International Journal of project management*, v. 20, n. 3, pp. 191–198, 2002.
- [6] THOMAS, J. E. *Fundamentos de engenharia de petróleo*. Interciência, 2001.
- [7] CAPRACE, J.-D., RIGO, P. “A real-time assessment of the ship design complexity”, *Computer-Aided Design*, v. 44, n. 3, pp. 203–208, 2012.
- [8] D’ALMEIDA, A. L. *Indústria do Petróleo no Brasil e no mundo: formação, desenvolvimento e ambiência atual*. Blucher, 2015.
- [9] SINAVAL. “Sindicato Nacional da Indústria de Construção e Reparação Naval e Offshore.” 2018. <http://sinaval.org.br/cenarios/>. Acesso: 2018.
- [10] DORES, P. B. D., LAGE, E. S., PROCESSI, L. D. “A retomada da indústria naval brasileira”. 2012. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/962?mode=full>>. [Online; acesso agosto de 2018].

- [11] BNDES. “*Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social / Biblioteca Digital*”. 2012. <http://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital>. Acesso: 2018.
- [12] SHIMAMURA, Y. “FPSO/FSO: State of the art”, *Journal of marine science and technology*, v. 7, n. 2, pp. 59–70, 2002.
- [13] TOMMELEIN, I. D. “Pull-driven scheduling for pipe-spool installation: Simulation of lean construction technique”, *Journal of construction engineering and management*, v. 124, n. 4, pp. 279–288, 1998.
- [14] TELLES, P. C. D. S. “Tubulações industriais”. In: *Tubulações industriais*, Livros Técnicos e Científicos, 1976.
- [15] SIMON, H. A. “The architecture of complexity”. In: *Facets of systems science*, Springer, pp. 457–476, 1991.
- [16] GIDADO, K. “Project complexity: The focal point of construction production planning”, *Construction Management & Economics*, v. 14, n. 3, pp. 213–225, 1996.
- [17] DAO, B., KERMANSHACHI, S., SHANE, J., et al. “Identifying and Measuring Project Complexity”, *Procedia Engineering*, v. 145, pp. 476 – 482, 2016. ISSN: 1877-7058. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.024>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816300285>>. ICSDEC 2016 – Integrating Data Science, Construction and Sustainability.
- [18] MAGEE, C. L., DE WECK, O. L. “An attempt at complex system classification”, 2002.
- [19] MAZNEVSKI, M., STEGER, U., AMANN, W. “Managing complexity in global organizations”, *Perspectives for Managers*, v. 141, pp. 1–4, 2007.
- [20] RODRIGUEZ-TORO, C. A., TATE, S., JARED, G., et al. “Complexity metrics for design (simplicity+ simplicity= complexity)”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v. 217, n. 5, pp. 721–725, 2003.
- [21] BOOTHROYD, G., DEWHURST, P., KNIGHT, W. A. *Product Design for Manufacture and Assembly, revised and expanded*. CRC press, 2001.
- [22] STURGES JR, R. H., KILANI, M. I. “Towards an integrated design for an assembly evaluation and reasoning system”, *Computer-aided design*, v. 24, n. 2, pp. 67–79, 1992.

- [23] BRAHA, D., MAIMON, O. “The measurement of a design structural and functional complexity”. In: *A Mathematical Theory of Design: Foundations, Algorithms and Applications*, Springer, pp. 241–277, 1998.
- [24] RODRÍGUEZ-TORO, C., TATE, S., JARED, G., et al. “Shaping the complexity of a design”. In: *ASME 2002 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pp. 641–649. American Society of Mechanical Engineers, 2002.
- [25] HON, K. “Performance and evaluation of manufacturing systems”, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 54, n. 2, pp. 139–154, 2005.
- [26] FREDENDALL, L. D., GABRIEL, T. “Manufacturing complexity: a quantitative measure”. In: *Proc. POMS Conference*, p. 2, 2003.
- [27] ISIK, F. “Complexity in supply chains: a new approach to quantitative measurement of the supply-chain-complexity”, *Supply chain management*, pp. 417–432, 2011.
- [28] SHANNON, C. E. “A mathematical theory of communication”, *ACM SIGMOBILE mobile computing and communications review*, v. 5, n. 1, pp. 3–55, 2001.
- [29] SUH, N. P. “A theory of complexity, periodicity and the design axioms”, *Research in Engineering Design*, v. 11, n. 2, pp. 116–132, 1999.
- [30] FRIZELLE, G., RICHARDS, H. “Tackling industrial complexity: the ideas that make a difference”. In: *2nd International Conference of the Manufacturing Complexity Network, Cambridge*, pp. 9–10, 2002.
- [31] FUJIMOTO, H., AHMED, A., IIDA, Y., et al. “Assembly process design for managing manufacturing complexities because of product varieties”, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, v. 15, n. 4, pp. 283–307, 2003.
- [32] HU, S., ZHU, X., WANG, H., et al. “Product variety and manufacturing complexity in assembly systems and supply chains”, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 57, n. 1, pp. 45–48, 2008.
- [33] ELMARAGHY, H., ALGEDDAWY, T., SAMY, S. N., et al. “A model for assessing the layout structural complexity of manufacturing systems”, *Journal of Manufacturing Systems*, v. 33, n. 1, pp. 51–64, 2014.
- [34] FISHER, M., HAMMOND, J., OBERMEYER, W., et al. “Configuring a supply chain to reduce the cost of demand uncertainty”, *Production and operations management*, v. 6, n. 3, pp. 211–225, 1997.

- [35] SAMY, S., ELMARAGHY, H. “A model for measuring complexity of automated and hybrid assembly systems”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 62, n. 5-8, pp. 813–833, 2012.
- [36] SU, Q., LIU, L., WHITNEY, D. E. “A systematic study of the prediction model for operator-induced assembly defects based on assembly complexity factors”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, v. 40, n. 1, pp. 107–120, 2010.
- [37] MITAL, A., DESAI, A., SUBRAMANIAN, A., et al. *Product development: a structured approach to consumer product development, design, and manufacture*. Elsevier, 2014.
- [38] WANG, J., CHANG, Q., XIAO, G., et al. “Data driven production modeling and simulation of complex automobile general assembly plant”, *Computers in Industry*, v. 62, n. 7, pp. 765–775, 2011.
- [39] KUZGUNKAYA, O., ELMARAGHY, H. A. “Assessing the structural complexity of manufacturing systems configurations”, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, v. 18, n. 2, pp. 145–171, 2006.
- [40] LEE, T.-S. *Complexity theory in axiomatic design*. Tese de Doutorado, Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [41] MODRAK, V., MARTON, D., KULPA, W., et al. “Unraveling complexity in assembly supply chain networks”. In: *Logistics and Industrial Informatics (LINDI), 2012 4th IEEE International Symposium on*, pp. 151–156. IEEE, 2012.
- [42] MODRAK, V., MARTON, D., BEDNAR, S. “Comparison of complexity indicators for assessing general process structures”, *Tehnički vjesnik*, v. 20, n. 6, pp. 1057–1062, 2013.
- [43] MODRAK, V., SOLTYSOVA, Z. “Novel complexity indicator of manufacturing process chains and its relations to indirect complexity indicators”, *Complexity*, v. 2017, 2017.
- [44] DESHMUKH, A. V., TALAVAGE, J. J., BARASH, M. M. “Complexity in manufacturing systems, Part 1: Analysis of static complexity”, *IIE transactions*, v. 30, n. 7, pp. 645–655, 1998.
- [45] FRIZELLE, G., WOODCOCK, E. “Measuring complexity as an aid to developing operational strategy”, *International Journal of Operations & Production Management*, v. 15, n. 5, pp. 26–39, 1995.

- [46] ZHANG, Z. “Modeling complexity of cellular manufacturing systems”, *Applied Mathematical Modelling*, v. 35, n. 9, pp. 4189–4195, 2011.
- [47] HORSLEY, D. *Process plant commissioning: a user guide*. IChemE, 1998.