



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Thiago Linhares Fernandes

**SIMULAÇÃO DE VARIAÇÕES NA GARANTIA DA QUALIDADE GEOMÉTRICA
DE TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS**

Florianópolis
2020

Thiago Linhares Fernandes

**Simulação de Variações na Garantia da Qualidade Geométrica
de Tubulações Industriais**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.

Coorientador: Prof. Christian Raffaelo Baldo, Dr. Eng.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Fernandes, Thiago Linhares Fernandes
Simulação de Variações na Garantia da Qualidade
Geométrica de Tubulações Industriais / Thiago Linhares
Fernandes Fernandes ; orientador, Gustavo Daniel Donatelli
Donatelli, coorientador, Crhistian Raffaello Baldo Baldo,
2020.

115 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Garantia da qualidade
geométrica. 3. Análise de variações. 4. Indústria 4.0. 5.
Gêmeo digital. I. Donatelli, Gustavo Daniel Donatelli. II.
Baldo, Crhistian Raffaello Baldo. III. Universidade Federal
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. IV. Título.

Thiago Linhares Fernandes
**Simulação de Variações na Garantia da Qualidade Geométrica
de Tubulações Industriais**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Rodrigo Junqueira Leão, DSc.
Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Crhistian Raffaello Baldo, Dr. Eng.
Coorientador

Florianópolis, 2020.

*Dedicado à minha esposa Jéssica – quem me inspira, motiva e
traz luz para que grandes desafios sejam superados.*

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi idealizado num tempo (recente) em que cabia um abraço, um aperto de mãos e um sorriso naqueles que contribuíram para execução desta pesquisa. O cronograma do projeto de dissertação não contemplava uma pandemia e o interesse pela pesquisa na temática de transformação digital se tornou uma necessidade.

Foi, sem dúvidas, um processo caótico de “*andar roendo as unhas durante a madrugada*¹”; buscar justificativas num “*por que escrevo?*”; lembrar que “*o que vou escrever já deve estar na certa de algum modo escrito em mim*²”; pensar que “*as coisas estão no mundo, só que eu preciso aprender*³”; evitar pensar em *Fabiano*⁴; não esquecer os “*deveres do criador para com a criatura*⁵”; e não deixar de respeitar quem lê, pois “*o autor escreve uma metade e a outra fica por conta do leitor*⁶”.

Foi difícil, às vezes doloroso, mas foi bom! Foi bom por causa das pessoas. Por todas as possibilidades que encontrei em cada um que me ajudou. Agradeço às muitas mãos que escreveram este trabalho.

Aos meus familiares:

- Minhas duas mães: Neisa e mãe Dadi. Meu pai, Maurício. Meu irmão, Diogo. Minha avó, Lina. E meu avô, José (*in memoriam*).
- Jéssica, meu amor, esposa e revisora.

Aos orientadores da pesquisa:

- Prof. Gustavo Donatelli, com quem aprendo diariamente e me desperta inspirações como engenheiro. Quem nos desafia a trabalhar de forma entusiástica. Uma pessoa intuitiva, um turbilhão de ideias.
- Prof. Crhistian Baldo, quem tive a oportunidade de encontrar em meus caminhos, me incentivando, em seus gestos e nas frestas, a ocupar lugares outros.

¹ Canção “Roendo as unhas”, composta por Paulinho da Viola.

² Clarisse Lispector em “A hora da estrela”.

³ Novamente, uma canção composta por Paulinho da Viola. Foram algumas horas de modelagem escutando-o no Spotify[®].

⁴ Fabiano, personagem de Graciliano Ramos em “Vidas Secas”, não queria aprender nada, pois, se aprendesse qualquer coisa, necessitaria aprender mais e nunca ficaria satisfeito.

⁵ Em muitos momentos, fui convidado pelo orientador a criar algo com responsabilidade. Fazendo-me lembrar de Frankenstein, escrito por Mary Shelley.

⁶ Joseph Conrad.

Aos amigos:

- Que me acolheram em Floripa e me incentivaram a não parar: Diogo, Maycon, Matheus e Everton.
- Tiago Zilio, amigo e colega de trabalho. Quem provocou, incentivou, ajudou e forneceu meios para que esta dissertação fosse iniciada e concluída.

Às instituições:

- CERTI – ora trabalho, ora escola – onde tenho a oportunidade de executar grandes projetos e aprender com muitos colegas. Em especial, Mateus Dieckmann e Luiz Henrique Seidler, que foram de fundamental importância para execução deste trabalho.
- UFSC – os colegas de curso (e de percurso), professores, técnicos, livros, bibliotecas, laboratórios, cursos, RU e outros espaços.
- PETROBRAS – por fomentar pesquisa, desenvolvimento e inovação neste país. O projeto TDSpools foi essencial para que este trabalho fosse viabilizado.

Aos que estão por toda parte:

- o pessoal do café, da limpeza, da manutenção, os que abrem e fecham os portões, os vigilantes, os motoristas, o pessoal do mercado e da feira – todos os que trabalharam para que o meu “direito” de estudar fosse assegurado.
- os negros, os pobres e os estudantes de escola pública que vieram antes de mim e conquistaram este lugar.

Diz Ifá que, após a Criação do Mundo, no transcurso de várias gerações, já não se viam mais, como no início, seres humanos dotados de força e estatura descomunal, capazes de arrancar do chão e carregar nas costas árvores gigantescas.

Então, abriu-se passagem a novos indivíduos, com as proporções como as atuais e que, ante a necessidade de realizarem construções enormes, utilizavam a inteligência dada pelos Benfeitores para executar obras magníficas com peças menores e facilmente manejáveis, bem como fazendo uso de mecanismos e artifícios para levantar pesos maiores.

Uma das divindades ensinou aos humanos como extrair e aproveitar os metais da terra.

A partir de então, as mulheres e os homens puderam usar sua inteligência em alguma atividade em que se sobressaíssem e, assim, podiam multiplicar suas virtudes. Aqueles seres que, no entanto, usam a inteligência na destruição são considerados o pior tipo de ser humano, muito abaixo dos ignorantes, que zombam do que não conhecem.

Sem dúvida, a partir dessa época, foi facultado aos humanos empregarem livremente sua inteligência nos mais variados propósitos, pois o que não se pode com a força se obtém com a inteligência.

Adaptado de “Ifá Lucumí: o resgate da tradição”, de Nei Lopes, pela Profa. Jéssica Lins de Souza Fernandes

A transformação digital não tem a ver com tecnologia – tem a ver com estratégia e novas maneiras de pensar.

David Rogers

RESUMO

A quarta revolução industrial, relacionada ao conceito de Indústria 4.0, tem despertado a digitalização da manufatura, através de tecnologias que constroem e amplificam umas às outras, conectando sistemas físicos e virtuais. Nesse sentido, a indústria de tubulações (*spools*) pode fazer uso de tecnologias digitais, fundamentadas no computador, a fim de adequar-se aos novos rumos da indústria e trazer mais valor para seus processos. Neste trabalho, é explorado o uso do gêmeo digital que, germinado como uma representação válida de uma entidade física, é capaz de incorporar modelos da realidade e realiza experimentos virtuais. A finalidade atribuída a esse protótipo digital busca garantir a qualidade geométrica dos *spools*, contribuindo com o controle e compreensão das variações dimensionais, bem como com a percepção sobre a impossibilidade de fabricar qualquer peça ou artefato sem desvios com referência à geometria desejada, mas que podem ser previstos e atenuados. Para tanto, são explorados os principais métodos, abordagens e ferramentas que envolvem o processo de garantia da qualidade geométrica. Com isso, dados são reunidos, armazenados e estruturados em um ambiente de gestão do ciclo de vida do produto, favorecendo o fluxo de informação e conhecimento entre as diferentes etapas de desenvolvimento do produto. De posse desses dados, é criada uma representação abrangente da geometria do *spool* e de seus componentes (tubos, curvas e flanges), viabilizando a construção de um modelo de análise de variações capaz de simular processos de fabricação e montagem, a fim de prever quantidades e causas de variação. Para experimentação virtual, é desenvolvida uma estratégia que permite observar e analisar as variações em casos *intra spool* e *entre spools*: o primeiro, relacionado ao *spool* como uma unidade individual; o segundo, relacionado à linha de tubulações, buscando prever problemas de montagem *on-site*. Esses experimentos consomem dados de projeto, fabricação e montagem, descritos em normas e documentos vigentes. Os resultados obtidos suscitam a interpretação de que a tolerância dimensional e geométrica pode ser adotada para estimar a capacidade do processo e para conhecer os agentes contribuintes para variação total. No entanto, os resultados também indicam que algumas normas e documentos vigentes definem especificações que comprometem requisitos funcionais do *spool* e da linha. De todo modo, o principal resultado obtido nesta pesquisa é a possibilidade de despertar um gêmeo digital para garantia da qualidade geométrica de tubulações industriais.

Palavras-chave: Garantia da qualidade geométrica. Análise de variações. Indústria 4.0. Gêmeo digital. Tubulações industriais.

ABSTRACT

The 4th industrial revolution, inside the concept of Industry 4.0, has raised the digitalization of manufacturing, through technologies that build and amplify each other, connecting physical and virtual systems. Inside this context, the piping/spool industry might use digital computer based technologies, in order to be aligned with the new directions of the Industry, bringing more value to its processes. The present work explores the use of a digital twin (DT) that, built as true representation of a physical entity, is able to embody models of the reality to carry out virtual experiments. The digital prototype main purpose is to assure the geometry quality of the spool, contributing with both control and comprehension of the dimensional variations, as well as the perception regarding the impossibility of a part or artifact being manufactured without geometric deviations, making possible to predict or mitigate those deviations. For this purpose, this work explores the main methods, approaches and tools for geometry quality assurance. To achieve this, data is gathered, stored and organized in a product life cycle management environment, promoting a flow of information and knowledge throughout the stages of product development. From this data, is possible to create a comprehensive model for the geometry of the spool and its components (pipes, elbows and flanges), enabling the creation of a variation analysis model capable of simulating the manufacture and assembly processes, in order to predict the amount and the causes of variation. For the virtual experiment, a strategy is developed to observe and analyze the variations for intra-spool cases, considering the spool as a single unit; and for cases between spools, related to piping lines, trying to predict assembly issues on-site. These experiments use project, manufacture and assembly data described in standards and current documents. The obtained results lead to an interpretation that the geometric and dimensional tolerances can be adopted to estimate the process capability and to identify the contributing factors for the total variation. However, the results also suggest that some standards and current documents have specifications that compromise functional requirements of both spool and line. In any event, the main result obtained in this research is the possibility of generating a digital twin for geometry quality assurance for industrial piping.

Keywords: Geometry quality assurance. Variation analysis. Industry 4.0. Digital twin. Piping industry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência de O&G.....	17
Figura 2 – Unidade de fabricação de <i>spools</i> (<i>pipe shop</i>).....	18
Figura 3 – <i>Spools</i> desalinhados.	21
Figura 4 – As revoluções industriais ao longo do tempo.	28
Figura 5 – Gêmeo Digital: uma nova abordagem para simulação.	31
Figura 6 – Custos devidos aos desvios da qualidade.....	34
Figura 7 – Processo de garantia da qualidade geométrica do <i>spool</i>	42
Figura 8 – Gestão das variações geométricas 4.0.	44
Figura 9 – Concepção de um gêmeo digital.	46
Figura 10 – Modelo de um <i>spool</i> e seus componentes.	49
Figura 11 – Fatores que afetam a qualidade geométrica do <i>spool</i>	49
Figura 12 – Diagrama de causas e efeito dos desvios geométricos do <i>spool</i>	51
Figura 13 – Abordagem metodológica da pesquisa.....	53
Figura 14 – Dados de dimensão e tolerância inseridos no protótipo digital.	58
Figura 15 – Spool-1D.	61
Figura 16 – Spool-2D.	61
Figura 17 – Spool-3D	62
Figura 18 – <i>Spools</i> de teste montados virtualmente – linha de tubulações.	63
Figura 19 – Interface do software adotado (Siemens VisVA TM).....	64
Figura 20 – Algumas <i>features</i> e anotações correspondentes à geometria do <i>spool</i>	66
Figura 21 – Diagrama de fluxo (árvore de modelamento).	67
Figura 22 – Simulação pelo método de Monte Carlo.....	68
Figura 23 – Planejamento experimental.	69
Figura 24 – Desvios típicos em tubulações industriais.....	70
Figura 25 – Janela de configuração da simulação.	72
Figura 26 – Distância face a face (Spool-1D).	75
Figura 27 – Alinhamento da junção (Spool-1D).	76
Figura 28 – Ângulo de inclinação (Spool-1D).	77
Figura 29 – Distância face a face (Spool-2D).	78
Figura 30 – Alinhamento da junção (Spool-2D).	79
Figura 31 – Ângulo de inclinação (Spool-2D).	80

Figura 32 – Distância face a face (Spool-3D).	81
Figura 33 – Alinhamento da junção do flange-B (Spool-3D).	82
Figura 34 – Alinhamento da junção do flange-A (Spool-3D).	83
Figura 35 – Ângulo de inclinação do flange-B (Spool-3D).	84
Figura 36 – Ângulo de inclinação do flange-A (Spool-3D).	85
Figura 37 – Sistema de fixação para montagem entre <i>spools</i>	87
Figura 38 – Alinhamento da junção na simulação <i>entre spools</i>	88
Figura 39 – Alinhamento da junção na direção x	89
Figura 40 – Alinhamento da junção na direção z	90
Figura 41 – Espaço excessivo ou folga entre flanges.	91
Figura 42 – Espaço excessivo ou folga entre flanges na direção y	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Trabalhos selecionados para leitura e análise.....	38
Quadro 2 – Normas vigentes adotadas para construção do protótipo digital.	57
Quadro 3 – Desvios relevantes de fabricação.....	58
Quadro 4 – Fluxo de atividades para construção do modelo de VA.	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
BDTD	Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações
BOM	<i>Bill of Materials</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CAT	<i>Computer Aided Tolerancing</i>
CERTI	Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras
CIRP	<i>International Academy for Production Engineering</i>
DDC	<i>Design for Dimensional Control</i>
FEA	Análise por elementos finitos
FPSO	Unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência
HLM	<i>High Low Median</i>
I4.0	Indústria 4.0
IoT	Internet das coisas
IT	Intervalo de tolerância
LIT	Limite inferior do campo de tolerância
LST	Limite superior do campo de tolerância
MMC	Método de Monte Carlo
O&G	Óleo e Gás
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PLM	<i>Product Lifecycle Management</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VA	<i>Variation Analysis</i> (Análise de Variações)
VisVA™	<i>Visualization Variation Systems Analysis</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

C_p	Índice de capacidade bilateral
C_{pk}	Índice de capacidade para processos não centrados
$1D$	Uma direção
$2D$	Duas direções
$3D$	Três direções
PA	Probabilidade de abrangência
Req	Requisito
Sim	Simulação
n	Número
\bar{x}	Estimativa da média do processo
s	Estimativa do desvio padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	A CADEIA DE SPOOLS	16
1.2	DECLARAÇÃO DO PROBLEMA	20
1.2.1	Contextualização e motivação.....	21
1.2.2	Objetivos.....	23
1.2.3	Contribuições para o conhecimento.....	23
1.3	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO.....	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
2.1	BREVE HISTÓRICO DO CONHECIMENTO	26
2.1.1	Antecedentes à Indústria 4.0.....	27
2.1.2	Design for Dimensional Control (DDC).....	29
2.1.3	Ferramentas de simulação de variações dimensionais	30
2.1.4	A importância do controle e compreensão das variações	33
2.1.5	Tirocínio – aprendizado preliminar no contexto da garantia da geometria	36
2.2	GARANTIA DA QUALIDADE GEOMÉTRICA DO SPOOL NA I4.0	41
2.3	O GÊMEO DIGITAL	44
2.3.1	O gêmeo digital para o projeto de <i>spools</i>.....	46
2.4	OS FATORES QUE IMPACTAM A QUALIDADE GEOMÉTRICA DO SPOOL..	48
3	MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1	ABORDAGEM METODOLÓGICA	52
3.2	O SOFTWARE ADOTADO PARA SIMULAR VARIAÇÕES.....	55
3.3	DADOS DE ENTRADA PARA CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO 3D.....	56
4	EXPERIMENTAÇÃO VIRTUAL	60
4.1	OS SPOOLS DE TESTE	60
4.2	MODELAMENTO E SIMULAÇÃO.....	63
4.2.1	O modelo de análise de variações	64
4.3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	68

4.3.1	Configuração de simulação	71
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES	74
5.1	VARIAÇÕES INTRA SPOOL.....	74
5.1.1	Spool-1D.....	74
5.1.2	Spool-2D.....	77
5.1.3	Spool-3D.....	80
5.1.4	Discussões – caso <i>intra spools</i>	85
5.2	VARIAÇÕES ENTRE SPOOLS.....	87
5.2.1	Discussões – caso <i>entre spools</i>	92
6	CONCLUSÃO	94
	REFERÊNCIAS.....	98
	APÊNDICE A – Buscas em bases de dados de publicações.....	106
	APÊNDICE B – <i>Spools</i> de teste e seus componentes	109
	APÊNDICE C – Sequência de montagem dos <i>spools</i> de teste.....	110
	APÊNDICE D – Relatórios dos agentes de contribuição para variação.....	112
	ANEXO A – Requisitos dimensionais da norma PETROBRAS N-115.....	115

1 INTRODUÇÃO

*Apenas os paranoicos sobrevivem.*⁷

Andy Grove

O ritmo dos últimos tempos, caracterizado por um mundo moderno, mutável e conectado, vem exigindo adaptações comportamentais e organizacionais repentinas. Para a indústria de Óleo e Gás (O&G) não é diferente e, mais do que nunca, a busca por excelência operacional torna-se um movimento indispensável para impulsionar a produtividade, aumentar a confiabilidade e reduzir custos e riscos.

O balanceamento matemático da equação que relaciona o quadrinômio risco, custo, produtividade e confiabilidade é complexo e não assegurar o equilíbrio desses fatores pode comprometer a existência de uma organização. Nesse sentido, o processo de transformação digital é um facilitador promissor do aumento da competitividade das empresas e indústrias, pois viabiliza a excelência operacional.

As tecnologias digitais, fundamentadas no computador, software e redes, não são novas, mas estão causando rupturas à terceira revolução industrial, tornando-se mais sofisticadas e integradas e, conseqüentemente, transformando a sociedade e a economia global (SCHWAB, 2016). De fato, a terceira revolução industrial foi marcada pela inserção de tecnologias digitais (ou do computador). No entanto, desde a virada do século XX para XXI, parte da humanidade vivencia experiências caracterizadas por uma internet mais disseminada e móvel, por sensores de tamanhos reduzidos, com maior capacidade e menor custo, bem como pela inteligência artificial e aprendizagem de máquina.

Esses elementos sustentam a chamada “Indústria 4.0” (I4.0), que descreve a quarta revolução industrial. Essa “revolução” denota uma mudança radical, ao viabilizar “fábricas inteligentes” (SURI, CUCCURU, *et al.*, 2017), nas quais sistemas físicos e virtuais estão associados e cooperam mutuamente, possibilitando a criação (ou adaptação) de novos modelos operacionais e a customização dos produtos. Da mesma maneira, o processo de desenvolvimento do produto está passando por mudanças radicais, considerando a crescente digitalização da manufatura promovida pelos sistemas de produção ciberfísicos, a internet das coisas, *big data*, computação em nuvem e o uso avançado de gêmeos digitais (SCHLEICH,

⁷ Durante a escrita desta dissertação, busquei ler sobre Transformação Digital, a fim de compreender até que ponto algumas “tendências” realmente se adequam, na prática, à realidade da indústria. Talvez nessa frase esteja resumida a necessidade de olhar para o futuro. Ver Rogers (2019).

WÄRMEFJORD, *et al.*, 2018). Essas tendências são parte de um ecossistema 4.0, propiciando um ambiente de manufatura conectado digitalmente.

Entre os processos que podem se beneficiar desse ecossistema 4.0 é o de garantia da qualidade geométrica dos produtos. O processo de garantia da geometria é transversal ao ciclo de desenvolvimento do produto e tem o intuito de compreender e reduzir as variações dimensionais, além de trazer à tona a conscientização sobre a característica intrínseca dessas variações nos processos de fabricação e montagem.

Destarte, faz-se necessário o estudo das variações dimensionais, que decorre da premissa da impossibilidade de manufaturar qualquer artefato nas suas dimensões nominais, seja por imperfeições do processo de fabricação, seja por imperfeições do processo de medição.

No contexto de O&G, a indústria de tubulações (*spools*) pode ser beneficiada com iniciativas que potencializem a transformação digital de seus processos. Assim, fazendo uso de ferramentas digitais, a proposição uma entidade virtual (gêmeo digital) que incorpora modelos da realidade e realiza simulações de variações dimensionais, aplicada ao projeto de tubulações industriais, contribui com a minimização da antítese entre grandes volumes envolvidos (tamanho, peso e custo, principalmente) e fábricas rudimentares, pois favorece o aumento da qualidade e integridade dos *spools*.

1.1 A CADEIA DE SPOOLS

Um *spool* é um subconjunto de uma linha, formado por pelo menos uma conexão e um trecho de tubo (PETROBRAS, 2016) e é encontrado em diversas partes nas instalações de produção e processamento do setor de O&G. Equipamentos submarinos, plataformas, poços terrestres e refinarias – é vasto o campo de aplicação desses tubos para conduzir os produtos ao longo das distintas etapas de processamento da energia, que devem transportar fluidos sob baixas perdas de carga e, sobretudo, alta segurança.

Os *spools* são fabricados em diferentes níveis da cadeia de fornecimento do setor de O&G e montados entre si e com outras partes de equipamentos, utilizando processos de soldagem ou fixação mecânica. Essa montagem acontece *on-site*, como apresentado na Figura 1, que exhibe uma unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência de petróleo e gás (FPSO) – isto é, em locais onde há muitas restrições de espaço e onde os requisitos de segurança são altamente considerados.

Figura 1 – Unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência de O&G.



Fonte: <https://www.marinha.mil.br/dpc/node/4062>.

No entanto, a fabricação do *spool* é realizada em instalações específicas, geralmente *off-site*, denominadas por *pipe shop*⁸. Nos *pipe shops*, as condições de produção são usualmente mais controladas quando comparadas às condições no sítio de instalação, permitindo alcançar uma qualidade, ainda que imprópria⁹, mais elevada no que se refere à geometria da tubulação. A Figura 2 apresenta uma unidade de fabricação de *spools*.

⁸ Por estrangeirismo, a palavra é adotada no Brasil para designar uma fábrica ou oficina de campo dedicada à produção de *spools*.

⁹ A palavra “imprópria” refere-se às práticas de fabricação que não são apropriadas para garantir a qualidade e integridade do produto final.

Figura 2 – Unidade de fabricação de *spools* (*pipe shop*).

Fonte: <https://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-pipe-shop.html>.

A cadeia de fabricação de tubulações industriais utiliza processos convencionais e carece de elevado nível de padronização, em que a qualidade final depende em grande parte das habilidades e do nível de capacitação do pessoal envolvido durante as etapas do processo. Esses fatores fazem com que os produtos nesse ramo apresentem desvios significativos da qualidade, o que, em geral, não é diferente para a indústria brasileira.

A realidade no dia a dia das etapas de fabricação e montagem de *spools* apresenta problemas como projetos de tubulação inconsistentes e planejamento da montagem sem integração com a instalação dos suportes. Esses resultam em danos severos para a produtividade em função dos custos associados a retrabalho em campo e mudanças tardias no projeto. Não é incomum que os *spools* fabricados por empresas brasileiras apresentem desvios significativos com referência à geometria desejada, que devem ser corrigidos na montagem, em condições mais precárias que aquelas nas quais o *spool* fora produzido. Esses retrabalhos geram atrasos na entrega das obras, além de possíveis prejuízos à integridade do *spool* e da instalação que o utiliza.

Embora sob condições operacionais antiquadas, distantes do que se espera com a I4.0, os *pipe shops* operam com grandes volumes de produção, envolvendo magnitudes expressivas de pesos, tamanhos, quantidades e fluxos de caixa. Estima-se que 40% dos homens-horas despendidos na construção de uma planta petroquímica referem-se à tubulação

(PETROBRAS/ABEMI, 2004). No ciclo de vida de plantas industriais, as tubulações têm maior peso físico-financeiro, quando comparadas às demais disciplinas de um empreendimento (NASCIMENTO, 2012). Segundo Pedro Telles (2001, p. 8), em função do vasto campo de aplicação, as tubulações industriais têm grande importância e são essenciais para o funcionamento das indústrias de processos, onde:

O valor das tubulações representa, em média, 20% a 25% do custo total da instalação industrial; a montagem das tubulações atinge, em média, 45% a 50% do custo total da montagem de todos os equipamentos; e o projeto das tubulações vale, em média, 20% do custo total do projeto da indústria.

Neste contexto, segundo John Biggs (1964), a tubulação constitui 25% a 35% do material de uma planta de processos. Mais recentemente, segundo Subhash Gangahar (2015), a tubulação representa 23% do peso associado a uma FPSO, o que reflete em 20% a 30% do custo da mesma. No entanto, a importância real dos *spools* pode exceder tais percentuais, pois um sistema (linha) de tubulação é composto por um grande número de componentes, com alto valor agregado e muitos fatores de risco. Mesmo assim, os *spools* geralmente são considerados um assunto de baixa tecnologia para muitas empresas e na academia (PENG e PENG, 2009).

De fato, os quantitativos que envolvem a disciplina de tubulações industriais são relevantes e, portanto, buscar soluções em consonância com novos rumos da indústria, favorece a redução de retrabalhos, riscos, custos e o aumento da produtividade do setor de O&G. Dessa forma, o novo paradigma da manufatura (I4.0) pode contribuir para as mudanças do estado atual, a partir de aplicações de tecnologias e métodos da transformação digital para dotar de inteligência¹⁰ os produtos e os processos de fabricação e montagem. Para tanto, é imprescindível a adoção de práticas de simulação computacional. Segundo Murat Gunal (2019, p. 8), a simulação é vital para a Indústria 4.0 e, na medida em que a digitalização aumenta, mais simulações serão vistas no futuro:

A simulação cresceu com a terceira revolução industrial e se preparou para a quarta revolução. Na era da Indústria 4.0, espera-se que a simulação por computador se torne um fator significativo do progresso.

¹⁰ Produtos inteligentes são aqueles que oferecem a capacidade de coleta de dados durante a operação, pois têm sensores embarcados e são conectados à internet (ABRAMOVICI, GÖBEL e SAVARINO, 2017).

Diante da magnitude do projeto de tubulações industriais, é imediato observar que a temática de análise de variações¹¹ (VA), através de experimentos virtuais dedicados à simulação dimensional, fortalece o movimento em direção à manufatura avançada.

O advento de tecnologias avançadas, como sistemas ciberfísicos, integração de sistemas, computação em nuvem, simulação e gêmeos digitais, é promissor para o aumento da qualidade do *spool*, melhorando processos e diminuindo custos. Particularmente, o uso do gêmeo digital é apresentado e explorado nesta pesquisa, por ser uma representação válida da realidade e, com isso, como um modelo de simulação, permite o processamento de dados que levam a previsões importantes durante o ciclo de vida do produto.

1.2 DECLARAÇÃO DO PROBLEMA

As plantas de processamento de fluidos podem ser empreendimentos com alto grau de complexidade. Por exemplo, a construção de uma FPSO exige uma grande quantidade de sistemas e operações, o que implica na necessidade de planejamento e integração entre diversas disciplinas, muitos departamentos e competências distintas para que o projeto seja executado da forma mais assertiva e satisfatória possível.

No entanto, a complexidade desses empreendimentos aumenta a incidência de retrabalhos e desperdícios e evidencia a falta de integração entre a realidade da fábrica (*pipe shop*) e o campo. Na prática, esses problemas podem comprometer a fabricação de um *spool* ou até mesmo inviabilizar a montagem de uma linha.

Do ponto de vista dimensional e geométrico, cada um dos componentes de um *spool* apresenta variações que, quando não controladas, podem comprometer a montagem das tubulações e, portanto, impedindo o processamento de energia. A Figura 3 ilustra um problema típico, em que os *spools* estão suficientemente desalinhados para inviabilizar a montagem da linha de tubulações.

¹¹ Em inglês, “*variation analysis*”. A escolha da sigla “VA” para descrever “análise de variações” justifica-se por ressoar o vocabulário adotado pela maioria dos autores referenciados neste documento.

Figura 3 – *Spools* desalinhados.

Fonte: <https://www.rem-b.com/en/equalizer/>.

Conforme o diâmetro da tubulação aumenta, os envolvidos com as etapas de fabricação têm maior dificuldade em executar os processos de soldagem dos componentes que configuram o *spool*. Da mesma maneira, as equipes de construção e montagem têm maior dificuldade em assegurar o alinhamento dos *spools*, o que pode representar problemas para equipamentos altamente sensíveis, como compressores e sistemas de medição. Além disso, problemas com a qualidade geométrica dos *spools* podem sobrecarregar as conexões de flanges, comprometendo a integridade de equipamentos de alto valor agregado que compõem uma linha de processamento.

1.2.1 Contextualização e motivação

Esta dissertação está contextualizada no Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) “Transformação Digital na Pré-fabricação de Tubulações: aplicação dos conceitos da Indústria 4.0 na concepção de um *pipe shop*” (Projeto TDSpools), executado pela Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras (Fundação CERTI), em convênio com a empresa Petróleo Brasileiro S. A. (PETROBRAS). O Projeto TDSpools tem como objetivo promover a melhoria da qualidade e da integridade dos *spools* fornecidos à indústria brasileira

de Petróleo e Gás, através da pesquisa para aplicação de princípios, tecnologias e métodos da transformação digital (Indústria 4.0) no projeto e fabricação de tubulações industriais.

Nesse contexto, esta dissertação contribui com as entregas do Projeto TDSpools, favorecendo a disseminação dos resultados da pesquisa. Este trabalho concentra-se na garantia virtual da geometria das tubulações industriais, fazendo uso de princípios e ferramentas de simulação que consolidam um gêmeo digital de *spools*. No entanto, cabe ressaltar que o foco dado a esta pesquisa de dissertação não faz parte do escopo do Projeto TDSpools, sendo portanto um trabalho, ainda que germinado e estimulado por esse projeto, com interesses e resultados independentes.

Dessa forma, a motivação deste trabalho reside em ampliar os conhecimentos sobre I4.0 e propor soluções para os *pipe shops* nacionais, a fim de torná-los mais competitivos, em função da adoção de alguns elementos que caracterizam uma manufatura digitalizada. Busca-se, assim, responder ao seguinte questionamento:

- Qual a contribuição dos métodos e ferramentas da garantia da qualidade geométrica no contexto da I4.0 para melhoria da competitividade da indústria de tubulações?

Considerando a complexidade e relevância da indagação proposta, quando não for possível uma solução universal, contribuir com os questionamentos que oportunizem mais estudos:

- Dada a quarta revolução industrial, que promove o aumento da digitalização da manufatura, quais as possibilidades para o processo de garantia da geometria das tubulações industriais?

- É possível estabelecer um gêmeo digital de *spools* que, munido da capacidade de realizar análises e simulações (experimentos virtuais), pode ser usado para identificar as causas principais de variações e prever problemas relacionados à geometria?

- Como um modelo de análise de variações pode ser concebido e utilizado durante o ciclo de desenvolvimento do *spool* a fim de trazer valor para alguma etapa ou atividade-chave para um projeto robusto?

Ao longo deste trabalho, é possível notar que essas interrogações foram usadas como guias para a pesquisa e para a seleção de meios que promovam a melhoria da qualidade e da integridade dos *spools*.

1.2.2 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é explorar os métodos e ferramentas da garantia da geometria para melhoria da qualidade geométrica na etapa de pré-fabricação de tubulações industriais, a fim de contribuir com a melhoria da competitividade da cadeia de *spools*, fazendo alusão à Transformação Digital (Indústria 4.0).

O objetivo geral pode ser desdobrado em objetivos específicos, que direcionam a consecução deste trabalho:

(a) Revisar a literatura a respeito da temática de garantia da qualidade geométrica, a fim de conhecer as principais abordagens, métodos e ferramentas, à luz de uma manufatura conectada digitalmente – Indústria 4.0.

(b) Conceber um gêmeo digital de tubulações industriais, que pode assumir atributos de um equivalente físico e, fazendo uso de dados de projeto, fabricação e montagem, é capaz de realizar experimentos virtuais com foco na garantia da qualidade geométrica.

(c) Propor práticas de garantia da qualidade geométrica aplicadas à cadeia de tubulações industriais, com o intuito de controlar e compreender as variações dimensionais. Dessa forma, trazendo benefícios às etapas que envolvem o ciclo de vida dos *spools*.

1.2.3 Contribuições para o conhecimento

Ao especificar a tolerância, o projetista exprime a faixa de variação aceitável para uma dada característica do produto. De outra maneira, a tolerância é o desvio admissível de um valor especificado ou de um padrão (YANG e EL-HAIK, 2008) e, portanto, ao definir esse desvio permissível, o projetista deve buscar uma relação de compromisso entre a técnica e a economia, ou seja, uma especificação que exija menor custo de fabricação, mas que não comprometa a funcionalidade do produto.

A adoção de práticas de projeto ultrapassadas e, portanto, não alinhadas com a realidade da Indústria 4.0, faz com que parte dos profissionais envolvidos com a fabricação de tubulações industriais não reconheça o papel da tolerância dimensional e geométrica e, com isso, não compreenda a necessidade de especificar melhor os seus produtos. Ainda que as variações ocorram naturalmente durante a fabricação, é necessário mantê-las dentro de limites toleráveis, que não comprometam a função do produto.

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, alguns *pipes shops* foram visitados, a fim de reconhecer e explorar as práticas atuais de projeto e fabricação de tubulações industriais. Dessas visitas, ficaram algumas evidências¹² e análises que contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação. Nesse sentido, esta pesquisa também tem o intuito de levar conhecimento sobre a importância dos limites toleráveis e da especificação, na perspectiva de contribuir com a formação de alguns atores que compõem um seguimento de extrema relevância para o país.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

A dissertação está estruturada em seis capítulos, compreendendo o Capítulo 1, esta Introdução, na qual está apresentada a temática abordada e os elementos que contextualizam, motivam e justificam o desenvolvimento da pesquisa com análise de variações, gêmeo digital e *spools*. Além disso, são expostos os questionamentos que dão norte a este trabalho, bem como os objetivos geral e específicos que este trabalho avista.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica que engloba esta pesquisa, destacando a revisão da literatura e os principais fundamentos teóricos necessários para o desenvolvimento desta dissertação.

No Capítulo 3 é apresentada a abordagem metodológica da pesquisa, trazendo uma visão transversal das atividades que englobam o desenvolvimento deste trabalho. Nesse capítulo são expostos e detalhados os dados de entrada e a ferramenta usada para construção do modelo de análise de variações.

O Capítulo 4 trata da experimentação virtual. Para tanto, são apresentados os *spools* de teste, os detalhes que envolvem o modelamento do protótipo 3D de análise de variações e o planejamento experimental.

No Capítulo 5 são expostos os resultados experimentais e as discussões a respeito dos resultados das simulações (experimentos virtuais) adotadas nos casos *intra spool* e *entre spools*.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões estabelecidas ao longo deste trabalho. Nesse capítulo, é descrito o que foi possível constatar e demonstrar ao longo da pesquisa, bem como são apresentadas algumas propostas de práticas voltadas para garantia da

¹² Numa visita a um *pipe shop*, questionei um dos funcionários da empresa a respeito das tolerâncias que não apareciam no desenho técnico mecânico e a resposta que obtive foi: “aqui nós não colocamos tolerância, pois fazemos tudo certinho”.

qualidade geométrica para a cadeia de tubulações industriais. Além disso, são apontadas algumas possibilidades de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

*Se a água do rio tá funda
Eu vou tomar banho na beiradinha.*¹³

Jongo do Pinheiral

A fim de explorar o estado da arte e entender como se produziram, até aqui, pesquisas que de alguma forma dialogam com a temática exposta e, mais ainda, buscar aprender com elas e identificar meios para que esta pesquisa contribua com os trabalhos que vêm sendo desenvolvidos no Brasil (e no mundo), foi estabelecida uma revisão da literatura e examinados os fundamentos teóricos que apoiam a formação da base do conhecimento.

2.1 BREVE HISTÓRICO DO CONHECIMENTO

A variação dimensional é evidenciada desde o momento em que a primeira peça foi produzida e controlada, seja de forma manual ou através de máquinas, com base em um desenho técnico mecânico. De fato, a variação ocorre naturalmente e está presente em toda a cadeia produtiva. A variação não pode ser totalmente eliminada, mas pode ser controlada dentro de intervalos (limites) aceitáveis.

No entanto, historicamente, as atenções voltadas para a temática de variação dimensional começaram a partir da produção em massa¹⁴, impulsionada pelas linhas de montagem no início do século XX, quando a intercambiabilidade¹⁵ entre peças resultou na necessidade de especificação de tolerâncias (SÖDERBERG, LINDKVIST, *et al.*, 2016).

Ao longo dos anos, embora a evolução tecnológica proporcione sistemas de produção e medição com maiores níveis de exatidão, é amplamente reconhecido que os desvios geométricos podem ser observados em todos os artefatos físicos. Esses desvios são originários de várias fontes e estão presentes ao longo das fases de desenvolvimento do produto.

¹³ Durante a escrita deste capítulo, passei algumas noites com inquietações que me levavam a crer que não seria possível descrever uma fundamentação teórica suficientemente embasada, respeitando a trajetória da indústria até os dias de hoje. Quando, para relaxar o pensamento com outras leituras, fui tomado por essas palavras em um livro que, imediatamente, me encorajaram a escrever.

¹⁴ Modo de produção em larga escala, difundido por Henry Ford no início do século XX.

¹⁵ Capacidade de montagem de peças e/ ou componentes, de tal forma que os requisitos de função e estética estejam assegurados.

2.1.1 Antecedentes à Indústria 4.0

As revoluções industriais ocorrem em consequência de mudanças radicais na tecnologia, na economia e, portanto, na maneira como a sociedade se organiza. A primeira revolução industrial (aproximadamente 1760-1840) foi desencadeada pela construção de ferrovias e pela invenção da máquina a vapor (DEANE, 1979), o que levou a um aumento significativo de produtividade. A segunda revolução industrial, iniciada na década de 1870, caracterizou-se pelo advento da eletricidade e da linha de montagem (STEARNS, 2013), o que viabilizou a produção em massa de produtos. A terceira revolução começou na década de 1960 e foi alavancada principalmente pelo uso de máquinas com controle numérico computadorizado, eletrônicos e robôs industriais (FESHINA, KONOVALOVA e SINYAVSKY, 2019), sendo impulsionada pelo desenvolvimento de semicondutores, do computador e da internet. Na terceira revolução industrial, como os sistemas de manufatura foram cada vez mais controlados por meio da eletrônica, isso alterou a necessidade de recursos humanos – no entanto, a produção continuou a aumentar. Durante as três primeiras revoluções industriais não houve um marco explícito e categórico que distinguisse o início e o fim de cada uma delas. Na verdade, elas foram nomeadas como “revoluções” após a transformação industrial ter começado ou depois de terem terminado.

Para Klaus Schwab (2016, p. 16), a quarta revolução industrial já pode ser percebida e vivenciada pela indústria e pela sociedade:

Ciente de várias definições e argumentos acadêmicos utilizados para descrever as três primeiras revoluções industriais, acredito que hoje estamos no início de uma quarta revolução industrial. Ela teve início na virada do século e baseia-se na revolução digital. É caracterizada por uma internet mais ubíqua e móvel, por sensores menores e mais poderosos que se tornaram mais baratos e pela inteligência artificial e aprendizagem automática (ou aprendizado de máquina).

A Figura 4 ilustra, ao longo do tempo, as transições na era industrial, destacando as quatro revoluções que sustentam a indústria mundial.

Figura 4 – As revoluções industriais ao longo do tempo.



Fonte: elaborada pelo autor.

No decorrer do tempo, a evolução tecnológica impulsionou a produtividade e o aumento da complexidade dos produtos. Antes da primeira revolução industrial, os produtos e artefatos eram fabricados principalmente por artesãos e, dessa forma, os diferentes estágios que envolvem o ciclo de desenvolvimento do produto, desde o projeto, fabricação e montagem, apresentavam forte dependência das habilidades humanas. À época, segundo Evans (1974), a gestão dos desvios geométricos das peças era realizada encaixando as peças em seus pares (peças) correspondentes, reduzindo manualmente os desvios “relativos” entre as peças para cada entidade. Para Srinivasan *et al.* (1996), em função da introdução de peças intercambiáveis no século XVIII, foram necessárias iniciativas em prol de uma fabricação eficiente, haja vista os requisitos atrelados à complexidade dos produtos. Ainda segundo Srinivasan *et al.* (1996), isso gerou uma divisão entre projeto e fabricação. Para Voelcker (1998), mesmo após muitos anos, essa dicotomia ainda é aparente no dia a dia de produção de muitas empresas, que são fortemente baseadas nos conceitos de intercambiabilidade total ou parcial, independência de processos e relacionamento com fornecedores.

Ao longo do século XX, marcado pela globalização, pelos conflitos geopolíticos e pelos avanços tecnológicos, surgiram personalidades e máximas como as de Walter Shewhart – “os dados não tem significado se apresentados fora de contexto” (SHEWHART, 1931),

William Deming – “não se gerencia o que não se mede, não se mede o que não se define, não se define o que não se entende, e não há sucesso no que não se gerencia” (DEMING, 1944), Joseph Juran – “não existe controle sem padronização” (JURAN, 1988) e Genichi Taguchi – “o custo é mais importante que a qualidade, mas a qualidade é a melhor maneira de reduzir custos” (TAGUCHI, 1986), importantes para o desenvolvimento da qualidade dos produtos e que, até os dias de hoje, trazem contribuições para a indústria. Nessa mesma publicação, Taguchi introduz, de forma original, o conceito de projeto robusto, isto é, aquele que é insensível a variações.

2.1.2 Design for Dimensional Control (DDC)

A técnica de *Design for Dimensional Control*¹⁶ (DDC) foi introduzida por Paul Leaney (1996, p. 173) com base na ideia de variação dimensional e, nessa publicação, alguns problemas na especificação, como dimensionamento e tolerância geométricos, medição e controle da variação dimensional foram descritos, assim como metodologias e ferramentas que permitem o DDC:

Design for Dimensional Control (DDC) refere-se à disciplina de controle dimensional do produto que reconhece e gerencia a variação durante o projeto, fabricação e montagem.

O objetivo do DDC é atender às necessidades do cliente quanto à aparência (estética) e função e, para tanto, incorpora uma série de ferramentas, técnicas, bem como exige uma estrutura organizacional que favoreça uma engenharia simultânea, envolvendo participação de equipes multifuncionais em todo o processo de desenvolvimento de produto.

Segundo Leaney (1996), os principais elementos dos custos de produção vêm da falha em entender o projeto para variação dimensional. Assim, o DDC não visa a eliminar a variação dimensional, até porque não seria possível – e, portanto, visa a gerenciar e compreender as variações. Ainda segundo Leaney (1996), o DDC deve ser visto como uma metodologia de engenharia combinada com ferramentas baseadas em computador usadas para melhorar a qualidade e reduzir os custos através de variação controlada e projeto robusto. Com uso de ferramentas de modelagem estatística e experimentação, é possível identificar

¹⁶ Em função da difusão da expressão “*Design for Dimensional Control*” nos meios industriais e acadêmicos, levando a comunicação usual através da sigla “DDC”, optou-se por não efetuar a tradução direta para português.

valores de parâmetros que tornam o produto ou processo insensível à variação encontrada no ambiente de fabricação. Nas palavras de Leaney (1996, p. 174): “o DDC é, para todos os efeitos, a aplicação do pensamento de robustez à variação dimensional”.

Para Sleath e Leaney (1997), as variações que ocorrem durante a fabricação e montagem dos componentes combinam-se e produzem variações nas dimensões críticas do produto final, as quais, se não devidamente controladas, podem resultar em perdas consideráveis de valor, qualidade, funcionalidade e desempenho. Com isso, o DDC minimiza os efeitos prejudiciais da variação dimensional oriundos de inovações de projeto, eliminando as fontes de variação desnecessárias e, então, através de uma seleção criteriosa dos processos de produção e medição, busca controlar sistematicamente a variação remanescente (CERQUEIRA, 2011).

Para tanto, o controle da variação dimensional do produto requer o uso de técnicas analíticas, baseadas em computação avançada, para predizer a provável amplitude de variação e suas principais causas nas características críticas do produto. No mercado, existem algumas opções de softwares comerciais que permitem que o projeto do produto e os processos de produção sejam testados por simulação.

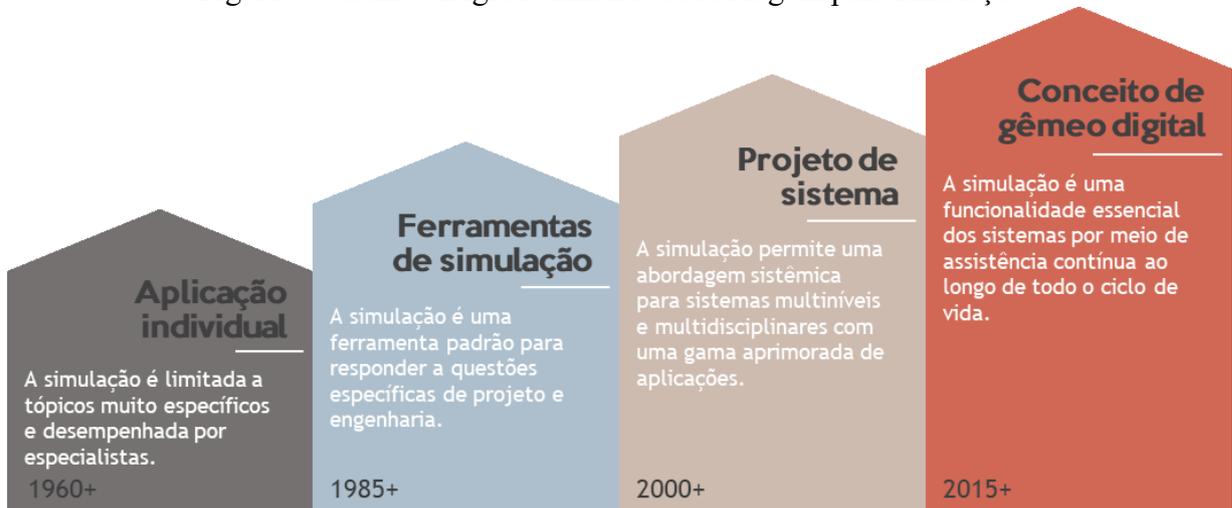
2.1.3 Ferramentas de simulação de variações dimensionais

Segundo Gunal (2019), a simulação tem sido usada na fabricação desde a sua origem na década de 1950, para entender e melhorar os sistemas de fabricação. De fato, existe uma demanda industrial crescente, impulsionada pela necessidade contínua de melhoria da qualidade e redução de custos, por controle da variação baseado na modelagem, análise e simulação de tolerância no processo de desenvolvimento do produto.

Nos últimos anos, as ferramentas de simulação deixaram de ser restritas aos especialistas em computação e, gradativamente, vêm fazendo parte da rotina de engenheiros, contribuindo com a formulação de projetos, tomada de decisões e resolução de problemas. Para Rosen *et al.* (2015), a partir de ferramentas computacionais, tem-se estabelecido cada vez mais uma “comunicação por simulação”, estendendo-a para as fases subsequentes do ciclo de vida como uma funcionalidade essencial do produto ou sistema. Mais recentemente, no contexto de simulação, tem-se explorado e empregado gêmeos digitais que, munidos de métodos e técnicas de análise, são capazes de dar suporte às diferentes etapas do ciclo de vida de um produto ou sistema. A Figura 5 ilustra, ao longo do tempo, as diferentes abordagens

relativas a modelagem e simulação, até o presente momento em que o conceito de gêmeo digital vem à tona como um agente facilitador de conexão entre o físico e o virtual.

Figura 5 – Gêmeo Digital: uma nova abordagem para simulação.



Fonte: Adaptada de (ROSEN, WICHERT, *et al.*, 2015).

Dessa forma, as ferramentas de simulação de variações dimensionais vêm ganhando mais espaço no cotidiano de engenharia, por favorecem a integração dos processos de desenvolvimento do produto. Assim, favorecendo também as etapas de planejamento e, consequentemente, minimizando os custos associados a desvios da qualidade.

O objetivo da análise de variações é simular cenários de produção em tempo real. Os softwares VA são usados para simulação de processos de fabricação e montagem para prever as grandezas e as causas da variação. Em outras palavras, os softwares VA são dedicados a acomodar a variação por meio de análises estatísticas ou otimizações de tolerância usando as ferramentas de *Computer Aided Engineering* (CAE), isto é, engenharia assistida por computador. Esses softwares também são frequentemente denominados como ferramentas de *Computer Aided Tolerancing* (CAT), isto é, toleranciamento assistido por computador. Hoje, com algumas devidas ressalvas, é evidente a importância da tolerância para assegurar a função do produto, trazendo benefícios para a qualidade e para o custo. Assim, os softwares (ou funcionalidade) CAT ajudam no diagnóstico de uma relação de compromisso entre os interesses dos envolvidos com o projeto do produto e com a fabricação. Para Chase e Greenwood (1986) a especificação de tolerância torna-se um elo crítico entre o projeto e a manufatura, um ponto de encontro comum onde requisitos concorrentes podem ser resolvidos.

No início da década de 1990, Turner e Gangoiti (1991) apresentaram uma pesquisa que, ainda que limitada à geometria 2D, trouxe uma visão importante sobre o que havia à disposição no mercado e destacando, à época, as possibilidades voltadas para análise de tolerância. Anos depois, Chase *et al.* (1997) apresentaram uma descrição de um sistema, disponível comercialmente, para modelagem e análise de tolerância de montagem. Na mesma época, Salomons *et al.* (1998) propuseram um trabalho que se destaca pela comparação entre os sistemas CAT existentes, elucidando as capacidades e funcionalidades das ferramentas. Numa abordagem semelhante, porém com mais destaque nos fundamentos teóricos de sistemas CAT, Prisco e Giorleo (2002) exploram diferentes softwares, apontando suas particularidades e o potencial dessas ferramentas para representar, manipular e analisar dados de dimensão e tolerância.

Ao longo do tempo, o entendimento da importância do processo de garantia da qualidade geométrica e da necessidade em desenvolver um conjunto de atividades em prol de controlar as variações do produto fez com que as ferramentas computacionais fossem aperfeiçoadas e disseminadas. Ainda que de forma modesta, a simulação de variações dimensionais vem ocupando lugar no fluxo de trabalho das empresas.

Segundo Krogstie *et al.* (2014), algumas ferramentas comerciais, como RD&TTM, VisVATM, 3DCSTM e CETOL 6 σ TM, podem fornecer um bom suporte para o desenvolvimento de produtos e processos, permitindo a previsão antecipada dos efeitos dos desvios geométricos das peças nas características do conjunto. Da mesma maneira, pacotes de softwares como EVOLVETM podem auxiliar no ciclo de vida dos produtos e processos, pois unem, de forma interativa e colaborativa, ferramentas CAD, CAE, CAT e outras (KOTEM, 2020).

As ferramentas disponíveis para análise de variações apresentam funcionalidades que visam, principalmente, a: (1) garantir a intercambiabilidade e a montagem de peças; (2) garantir folgas apropriadas entre as peças adjacentes; (3) determinar o impacto da variação dimensional sobre os requisitos que comprometem a função e a estética do produto; e (4) garantir que as dimensões e tolerâncias funcionais sejam apropriadas para o processo.

Consoante a isso, as ferramentas de simulação de variações são aparatos computacionais que, fazendo uso da estatística, permitem que os efeitos de desvios de fabricação e montagem sejam simulados, visualizados e analisados antes que o produto físico seja fabricado. Essas funcionalidades permitem que diferentes conceitos de projeto do produto sejam gerados e comparados, favorecendo a tomada de decisão.

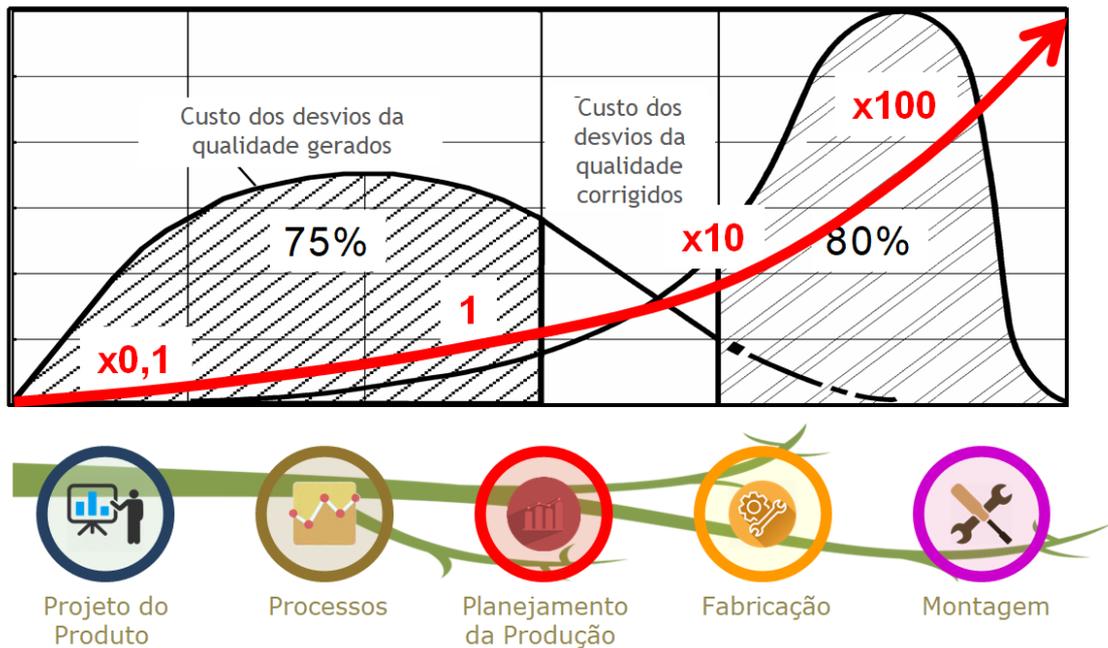
Ao longo dos anos, os softwares dedicados à análise e variações assumiram desafios e, cada vez mais, vêm buscando adequação às demandas da indústria. Hoje, diante dos avanços computacionais, as ferramentas CAE e CAT disponíveis têm alta maturidade e são muito abrangentes em seus recursos de simulação. No entanto, mais importante do que a possibilidade de criar modelos sofisticados de simulação é atender-se à importância de controlar e compreender as variações. Alguns setores industriais ainda carecem dessa percepção.

2.1.4 A importância do controle e compreensão das variações

A prática de simulação de variações contribui com a redução dos impactos negativos da variação dimensional na qualidade do produto, além de minimizar custos e tempos de produção. Conforme apontado e destacado até aqui, todos os processos de fabricação e montagem são perturbados por variações. Portanto, o intuito é buscar mecanismos que atenuem o efeito da variação, bem como ferramentas de simulação que permitam a identificação das suas causas, trazendo benefícios às etapas que envolvem o desenvolvimento do produto.

Atualmente, há poucas divergências quanto ao êxito em desenvolver considerações antecipadas das variações da fabricação já durante a etapa de projeto. Ainda no século XX, conforme ilustrado na Figura 6, Pfeifer e Torres (1999) apontaram que 75% dos custos devidos a desvios da qualidade são gerados nas etapas de planejamento, antes de começar a fabricação do produto. Também, nessa mesma pesquisa, os autores destacam que 80% dos custos associados à correção dos desvios da qualidade se produzem durante as fases de inspeção e utilização do produto. Nesse mesmo sentido, segundo Söderberg *et al.* (2017), os problemas relacionados à geometria resultam em atrasos e alterações tardias, o que geralmente constituem uma parte significativa do custo total da baixa qualidade.

Figura 6 – Custos devidos aos desvios da qualidade.



Fonte: Adaptada de (PFEIFER e TORRES, 1999).

A realidade atual vem exigindo produtos cada vez mais competitivos. Nguyen *et al.* (2010) relatam que frente a esse mercado competitivo, o sucesso e a permanência de uma empresa está diretamente associado à sua capacidade de introduzir novos produtos em menos tempo e menores custos, aumentando-se a qualidade e o valor tecnológico agregado aos mesmos, na mesma proporção em que a confiabilidade do produto é validada pelos consumidores.

De fato, desenvolver modelos de engenharia que toleram a variação é uma ação que vai ao encontro da garantia da integridade de produtos e sistemas. Nesse sentido, Parkinson (1995) examinou como modelos de engenharia podem ser usados para desenvolver projetos robustos, que toleram variação. Esses modelos podem prever o desempenho e podem controlar o efeito da variabilidade no projeto. Ainda segundo Parkinson (1995), contabilizar a variação dimensional é essencial para o desenvolvimento de produtos de classe mundial. Cada desenho técnico de engenharia está sujeito à variação que pode ser oriunda de diversas causas, incluindo operações de manufatura, propriedades do material e ambiente operacional. Quando a variação é ignorada, o projeto pode resultar em produtos caros para se produzir ou que falham em serviço.

Weckenmann (2008) afirma que, ao integrar projeto, engenharia e manufatura sob um mesmo contexto, é possível produzir de acordo com as necessidades do cliente e sob

conceitos mais exigentes de produção, graças às pesquisas em Metrologia e sistemas de tolerâncias. Para Giordano *et al.* (2008), essa integração da manufatura com a engenharia também serviu de estímulo para comprovar a importância da tolerância no processo de desenvolvimento do produto, na mesma razão de importância em que o gerenciamento das variações geométricas assume no projeto do produto, num contexto de engenharia simultânea, em que engenheiros e projetistas precisam gerenciar as tolerâncias geométricas e dimensionais e saber quais informações contribuem para essa determinação.

Segundo Ebro (2014), tipicamente 60% de todas as alterações tardias no desenvolvimento de um novo produto estão relacionadas a conceitos ou tolerâncias sensíveis ou pouco claras. Os custos da empresa devido às alterações tardias podem ser bastante extensos e, portanto, o caminho em direção à prevenção precoce de falhas, com foco em conceitos mais robustos, apresenta grandes potenciais operacionais.

Segundo Schleich (2013), frequentemente os desvios geométricos das peças se somam a outros desvios causados por fenômenos físicos, como desgaste, expansão térmica ou deformações das peças e, portanto, deterioram ainda mais a qualidade do produto durante o uso. Consequentemente, segundo Wartzack *et al.* (2011), há uma forte necessidade de as empresas gerenciarem esses desvios geométricos durante todo o ciclo de vida do produto.

Nas últimas décadas, essa percepção levou ao surgimento de várias metodologias de projeto orientadas à qualidade, impulsionando o uso de métodos e ferramentas sofisticadas para análise e verificação virtual das soluções de projeto escolhidas (THORNTON, 2003). Em um procedimento abrangente de gestão das variações, são identificadas e incorporadas ao modelo de variação as características do produto cujos desvios esperados do valor nominal resultam em uma perda (ou risco) inaceitável para as empresas (DANTAN, HASSAN, *et al.*, 2008).

Com os avanços das discussões que envolvem a fundamentação da manufatura avançada (I4.0), a análise da variação dimensional reafirma-se como uma ferramenta dotada de inteligência, capaz de promover melhorias na produtividade, com base em dados do processo. Para Cai *et al.* (2015), a análise de variação está se tornando uma questão crítica ao especificar e verificar os requisitos geométricos e dimensionais de montagem. No mesmo sentido, para Schleich *et al.* (2018), a indústria vem enfrentando uma situação na qual diferentes departamentos e atores, desde a etapa de projeto do produto até a fabricação, inspeção, montagem e testes estão envolvidos no processo de gestão das variações geométricas.

No entanto, são grandes os desafios que envolvem a análise sistemática de variações, exigindo a disponibilidade de recursos geométricos, dados de dimensões e o conjunto de informações e especificações confiáveis que possam servir de entrada para uma análise de variação baseada em um software CAE (ou CAT). Para Eifler *et al.* (2016), isso requer dados completos e precisos sobre a variação de fabricação, além de uma descrição homogênea da variação de fabricação (geralmente uma descrição estatística completa para todos os parâmetros de entrada considerados).

De fato, fazendo alusão às tendências atuais e à perspectiva de uma manufatura conectada digitalmente, são esperados resultados como alta produtividade, flexibilidade e minimização de retrabalhos. Portanto, numa indústria (4.0) na qual a produção é altamente automatizada e conectada, o retorno do investimento deve ser proporcional à qualidade do produto.

2.1.5 Tirocínio – aprendizado preliminar no contexto da garantia da geometria

A partir dos trabalhos encontrados pelos diferentes modos de busca, foi feita uma leitura minuciosa de seus resumos e conteúdos, buscando refinar o levantamento em conformidade com a temática desta dissertação. Dessa forma, foi feita uma seleção daqueles considerados mais relevantes para pesquisa e, nesses, foi feito um levantamento das metodologias, conceitos principais e os estudos de casos adotados, a fim de melhor compreender como estão sendo feitas as investigações com análise de variações. Com essa varredura, foi possível identificar estratégias de pesquisa e metodologias adequadas para a realização do trabalho. Foram feitas buscas em três diferentes bases de dados: o Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) e os Anais da *Conference on Computer Aided Tolerancing* (CIRP CAT). Os dados obtidos a partir dessas buscas estão disponíveis no Apêndice A.

De posse desses dados que revelam a quantidade de publicações encontradas nas bases BDTD e CAPES, vem à tona a escassez de trabalhos que se destinam a discorrer sobre a temática aqui explorada. Principalmente no Brasil, onde os resultados são nulos.

Passando para as buscas realizadas em anais de eventos, foram pesquisados os trabalhos apresentados na *Conference on Computer Aided Tolerancing* (CIRP CAT). Foram

buscados somente os trabalhos publicados entre os anos de 2009 e 2019, utilizando o termo “*variation analysis*” como único campo de busca.

Ao analisar esses trabalhos publicados na CIRP CAT é possível observar a predominância das discussões sobre análise de variações em países europeus; quando não, na China e nos Estados Unidos. De fato, boa parte dos referenciais explorados nesta dissertação corrobora com essa evidência, isto é, despertam a conclusão de que a maioria das pesquisas que envolvem a interseção entre análise de variações, garantia da geometria, gêmeo digital e I4.0 concentra-se nos meios que circundam a Europa. É possível notar que os países da União Europeia são fortemente influenciados pelas tendências que envolvem a I4.0, o que também é observado por Gunal e Karatas (2019).

Além disso, é possível constatar que há um aumento do número de trabalhos envolvendo a temática nas últimas três edições da conferência, principalmente em 2016. É provável que essa progressão seja em função de, a partir de 2011, cunhar-se a expressão “Indústria 4.0”¹⁷, com o intuito de descrever a quarta revolução industrial, caracterizada por um ambiente onde sistemas físicos e virtuais de fabricação cooperam de forma global, flexível e confiável. Assim, atividades de simulação (dimensional) que envolvam tecnologias digitais, estão em consonância com os princípios e perspectivas dessa revolução.

Ainda, ao analisar setores industriais nos quais as pesquisas e trabalhos vêm sendo dedicados no período estipulado de dez anos, é possível notar uma predominância acentuada da aplicação de conceitos de simulação dimensional nos setores aeronáutico e automotivo. Desta pesquisa, notou-se que quase 50% das contribuições para o estado da arte vêm impulsionadas por esses setores, justamente pela forte concorrência internacional e pelos requisitos da qualidade dos produtos. Mas, no contexto de O&G, embora seja um setor estratégico em que as cifras resultantes apresentam alto impacto econômico para muitos países, não é possível notar (pelo menos ainda) pesquisas e iniciativas para minimizar os efeitos dos desvios geométricos das peças na qualidade do produto durante o ciclo de vida.

Somadas todas as pesquisas feitas nas diferentes bases e utilizando diferentes estratégias de busca, foi encontrado um total de 58 trabalhos, distribuídos em instituições de todo o mundo. Cabe ressaltar que no Brasil (e no mundo), ainda que não apareçam publicações em formato de teses, dissertações ou artigos científicos nas bases investigadas, a temática de análise de variações ou variação dimensional é explorada e documentada também

¹⁷ O termo foi criado em 2011 na feira de Hannover, na Alemanha, a fim de descrever como a quarta revolução industrial iria, à época, revolucionar a organização das cadeias globais de valor (SCHWAB, 2016).

em formatos de relatórios e documentos relativos a assessorias empresariais, através de grupos independentes ou instituições de pesquisa, principalmente no âmbito de Engenharia Dimensional. No entanto, esses documentos geralmente não estão disponíveis para consulta pública.

Listados os trabalhos que de alguma forma abarcam os objetivos desta pesquisa, foi feita a leitura dos resumos, adotando um critério de classificação com base em uma escala de Likert¹⁸. Assim, foi possível selecionar, ainda que a tirocínio, aqueles que mais trariam contribuições neste momento. No total, seis trabalhos foram selecionados para leitura e análise mais detalhada. No Quadro 1 são apresentadas as publicações escolhidas para essa etapa.

Quadro 1 – Trabalhos selecionados para leitura e análise.

Meio de publicação e ano	Título da publicação	Primeiro(a) autor(a) / Instituição
Advances in Computational Design - Techno-Press Journals, 2019	Industry 4.0 – A challenge for variation simulation tools for mechanical assemblies	Srinivasa Murthy Boorla / Technical University of Denmark (DTU)
CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, 2018	Geometrical Variations Management 4.0: towards next Generation Geometry Assurance	Benjamin Schleich / Friedrich-Alexander-University Erlangen-Nürnberg (FAU)
CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, 2016	Virtual Geometry Assurance Process and Toolbox	Rikard Söderberg / Chalmers University of Technology
CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, 2016	Toward Meaningful Manufacturing Variation Data in Design – Feature Based Description of Variation in Manufacturing Processes	Tobias Eifler / Technical University of Denmark (DTU)
CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2017	Toward a Digital Twin for Real-Time Geometry Assurance in Individualized Production	Rikard Söderberg / Chalmers University of Technology
ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2017	Inspection Data to Support a Digital Twin for Geometry Assurance	Kristina Wärmefjord / Chalmers University of Technology

Fonte: elaborado pelo autor.

¹⁸ Tipo de escala de resposta adotada geralmente em questionários para medir o nível de concordância com uma dada proposição ou afirmação.

Embora os trabalhos apresentados no Quadro 1 estejam em consonância com as práticas mais avançadas de manufatura digitalizada e, sobretudo, a caminho de um domínio da transformação digital, nenhum deles traz discussões ou estudos de casos relacionados ao setor de O&G. No Brasil, esse setor energético mantém uma tradição de investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação, mas ainda assim, não é raro notar no dia a dia a adoção de práticas convencionais e não efetivamente alinhadas com a rota da quarta revolução industrial. Nesse sentido, foi feita uma análise crítica desses referenciais teóricos, a fim de trazer contribuições e buscar meios que possam melhorar a competitividade da cadeia de tubulações industriais.

No artigo intitulado *Industry 4.0 – A challenge for variation simulation tools for mechanical assemblies* os autores trazem conceitos sobre a Manufatura Inteligente e apresentam, através de um fluxo de trabalho, como as informações circulam entre as etapas para viabilizar a análise de variações. No entanto, este artigo busca provocar discussões sobre a arquitetura atual dos softwares VA, confrontando-a com as premissas e necessidades de um cenário de manufatura digitalizada (I4.0) e, neste contexto, apresentando os desafios que precisam ser alcançados para a quarta revolução industrial. Assim, fica a incitação de que as ferramentas VA precisam desenvolver interface de manufatura, na qual o conceito de produção, a exatidão do equipamento, os limites e os níveis de ajuste e a incerteza de medição possam ser alimentados (BOORLA, BJARKLEV, *et al.*, 2019). Esse artigo é importante para balizar as entradas e saídas esperadas ao longo das etapas do processo de desenvolvimento do produto, incorporando as oportunidades que as ferramentas de análise de variações podem trazer para o ciclo de vida do produto, bem como para as equipes envolvidas com a engenharia e manufatura.

No artigo *Geometrical Variations Management 4.0: towards next Generation Geometry Assurance* os autores discorrem sobre a gestão de variações geométricas e garantia da geometria no contexto de I4.0. A indústria, atualmente, está enfrentando a situação na qual muitos departamentos e diferentes atores, desde o projeto do produto até a fabricação, inspeção, montagem e teste, estão envolvidos com o processo de gerenciamento de variações geométricas (SCHLEICH, WÄRMEFJORD, *et al.*, 2018). Dessa leitura, despertam elementos como sistemas de produção ciberfísicos, *big data*, computação em nuvem, internet (das coisas) e gêmeo digital, que vêm promovendo um ambiente de manufatura conectado digitalmente, favorecendo o aumento da produtividade. Em especial, a proposta de um gêmeo digital traz benefícios para o desenvolvimento desta dissertação por descrever uma entidade

virtual que incorpora modelos da realidade e tem a capacidade de realizar análises e simulações com base em dados. De fato, um protótipo digital de tubulações industriais pode contribuir com as diferentes etapas ao longo do ciclo de vida do produto.

O artigo *Virtual Geometry Assurance Process and Toolbox* busca aproximar as áreas da qualidade, tolerância e robustez, a fim de relacioná-las com o processo de desenvolvimento do produto, descrevendo um procedimento de trabalho e um conjunto de ferramentas para gerenciar variações. Além disso, os autores apresentam algumas atividades que visam a minimizar o efeito da variação geométrica do produto final. Os pesquisadores envolvidos nesse trabalho estão há mais de duas décadas acompanhando a realidade da indústria e vêm publicando conteúdos que corroboram com a importância de criar modelos de simulação de variações para favorecer o desenvolvimento do produto. Nessa conjuntura, o processo de garantia da geometria é uma ação central para empresas que produzem produtos físicos (SÖDERBERG, LINDKVIST, *et al.*, 2016), incitando o interesse em desenvolver um modelo de montagem virtual de tubulações industriais que contribua para a garantia da geometria de *spools*, com a finalidade de favorecer a montagem no campo.

No artigo *Toward Meaningful Manufacturing Variation Data in Design – Feature Based Description of Variation in Manufacturing Processes* os autores apresentam a importância de assegurar o uso de dados confiáveis para compor as análises de variações de fabricação. Ainda que seja sabida a necessidade de atenuar os efeitos da variação, a confiabilidade das análises de variações não é, contudo, garantida apenas pela disponibilidade de métodos e ferramentas sofisticadas, mas dependente da exatidão das informações de entrada (EIFLER, BOORLA e HOWARD, 2016). Nesse artigo, é sugerido um esquema para descrever de forma consistente a variação da manufatura, a fim de viabilizar que o modelo de análise de variações forneça resultados confiáveis, trazendo benefícios às áreas de projeto do produto, manufatura e metrologia. Para a cadeia de tubulações, principalmente por ser uma indústria que opera com grandes volumes de produção, é importante atentar-se ao desenvolvimento de um modelo de simulação que opere com dados de entrada consistentes, haja vista que seus resultados podem trazer impactos valorosos para o comissionamento dos *spools*.

O artigo *Toward a Digital Twin for Real-Time Geometry Assurance in Individualized Production* propõe, de forma original, o desenvolvimento de um gêmeo digital para garantia da geometria, corroborando com a importância de desenvolver modelos de simulação para contribuir com as diferentes fases do ciclo de desenvolvimento do produto. O gêmeo digital é

criado e usado na fase de projeto para desenvolver produtos robustos e distribuir tolerâncias, mas também herdado posteriormente na fase de produção para servir como um controlador em tempo real para o sistema de montagem (SÖDERBERG, WÄRMEFJORD, *et al.*, 2017). De forma semelhante, haja vista que são publicações nas quais os mesmos pesquisadores fazem parte, no artigo *Inspection Data to Support a Digital Twin for Geometry Assurance* os autores exploram e refinam o conceito de gêmeo digital para garantia da geometria. Para tanto, fazem alusão aos dados que são gerados durante o processo de produção das peças e como eles podem ser coletados, armazenados e utilizados para compor o modelo digital. Uma seleção inteligente de dados é uma maneira de transformar informações em conhecimento e usar todo o potencial do *big data* para um gêmeo digital (WÄRMEFJORD, SÖDERBERG, *et al.*, 2017). O artigo apresenta o processo de criação de um gêmeo digital, dando ênfase à necessidade de assegurar uma finalidade para esse modelo virtual, que tem aplicações distintas nas diferentes fases de desenvolvimento do produto. Assim, no contexto de fabricação de tubulações industriais, um gêmeo digital de *spools* pode ser desenvolvido para estimular um processo geometricamente robusto, no qual as variações são consideradas e tratadas com o intuito de favorecer a etapa de montagem, reduzindo os custos associados a alterações tardias no projeto e os índices de retrabalho no *pipe shop*.

Da leitura e análise crítica desses trabalhos, foi possível tomar conhecimento sobre algumas oportunidades e tendências no contexto de simulação de variações e, principalmente, incorporar alguns limites e possibilidades do uso da ferramenta de análise de variações no contexto de O&G. Dessa forma, foram explorados alguns conceitos e tecnologias atuais que remetem à manufatura avançada, transformação digital, sistemas ciberfísicos, gêmeo digital e, sobretudo, a ações voltadas para a Indústria 4.0.

2.2 GARANTIA DA QUALIDADE GEOMÉTRICA DO SPOOL NA I4.0

Em função da crescente digitalização da manufatura, os processos de desenvolvimento de produtos estão passando por mudanças e/ou adaptações que proporcionam um ambiente de produção conectado digitalmente. Da mesma maneira, a fábrica de *spools* pode ser beneficiada com iniciativas que provoquem modificações nas práticas atuais, a fim de favorecer a produtividade da cadeia de tubulações, bem como elevar a competitividade da indústria.

Para tanto, é fundamental que as variações geométricas dos *spools* sejam consideradas, identificadas e controladas, proporcionando ganhos para as etapas de fabricação e montagem. O processo de gestão e garantia da geometria dos *spools* vai ao encontro da melhoria da qualidade e integridade das tubulações industriais.

Segundo Schleich *et al.* (2018), a gestão de variações geométricas e a garantia da geometria descrevem todos os esforços relacionados ao controle e minimização dos efeitos dos desvios geométricos da peça na qualidade do produto durante todo o seu ciclo de vida, principalmente considerando variações inevitáveis nos processos de fabricação e montagem. De outra maneira, para Schleich (2017), a gestão das variações geométricas pode ser entendida como o conjunto de atividades relacionadas ao controle de desvios geométricos e seus efeitos sobre a qualidade do produto durante o seu ciclo de vida. Para Söderberg *et al.* (2016), as atividades de garantia da geometria podem ser encontradas nas diferentes etapas do ciclo de desenvolvimento do produto. De posse dessa reflexão, a Figura 7 apresenta o processo e as atividades esperadas para garantia da qualidade geométrica, fazendo alusão à cadeia de *spools*.

Figura 7 – Processo de garantia da qualidade geométrica do *spool*.



Fonte: Adaptado de (SÖDERBERG, WÄRMEFJORD, *et al.*, 2017).

Assim, fazendo uso do processo proposto por Söderberg *et al.* (2017; 2016) e adaptando-o à cadeia de tubulações industriais, na fase de projeto do *spool*, os conceitos são definidos, analisados, experimentados e otimizados virtualmente com o intuito de suportar variações durante a fabricação e montagem. Para tanto, os requisitos funcionais do *spool* são definidos e decompostos em tolerâncias dimensionais e geométricas. Na fase de pré-fabricação, os dados de tolerância dos componentes do *spool* (por exemplo, tubos, curvas e flanges) e o sistema de produção são verificados e testados. Ajustes são feitos para corrigir

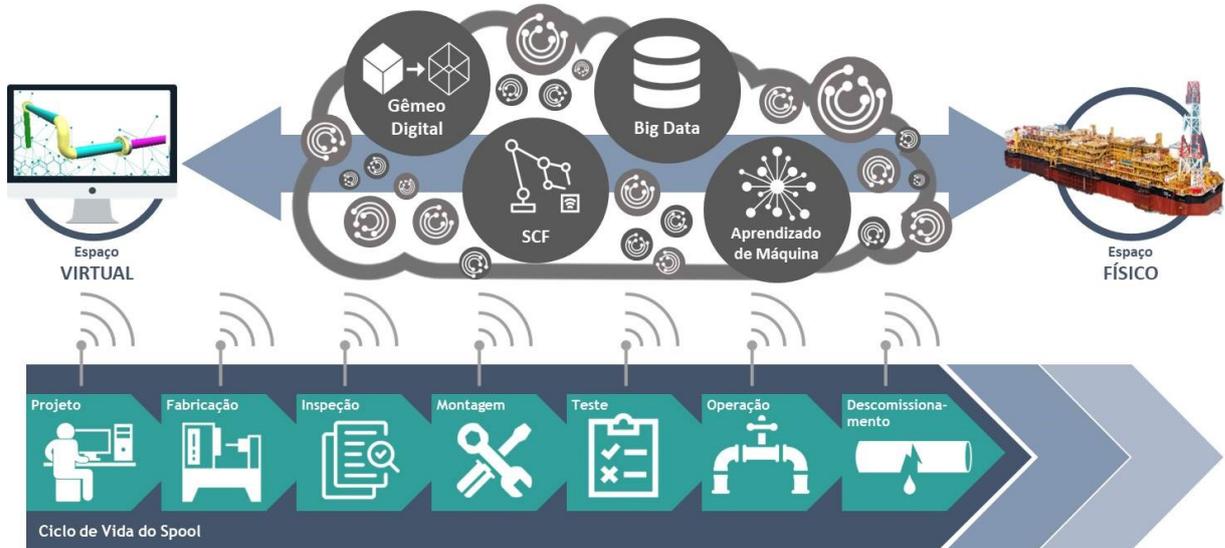
erros iniciais e para preparar a produção completa. Ainda, na etapa de pré-fabricação, é realizado o planejamento da medição e teste, assim como são definidas as estratégias e rotinas de inspeção (WÄRMEFJORD, SÖDERBRG, *et al.*, 2017). Na fase de fabricação, todos os ajustes iniciais do processo de fabricação são concluídos e o *spool* está em plena produção. Os dados de inspeção de componentes como tubos, curvas e flanges e suas submontagens correspondentes são usados para controlar a fabricação.

Para que esse conjunto de atividades ocorra de forma sinérgica, a Indústria 4.0 estabelece uma amálgama entre a manufatura e as tecnologias de gestão dos processos e integração da equipe, isto é, avançadas tecnologias da informação e comunicação (TIC). Para tanto, adotando mecanismos que permitem a conexão entre o ambiente físico e o virtual, essa conexão é estabelecida por sistemas ciberfísicos.

Segundo Monostori *et al.* (2016), sistemas ciberfísicos são entidades computacionais que, de forma colaborativa, estão em intensa conexão com o ambiente físico e seus processos em andamento, fornecendo e usando, ao mesmo tempo, serviços de acesso a dados e processamento de dados disponíveis na internet. Além disso, a Internet das Coisas (IoT) permite a transferência contínua de informações entre humanos, máquinas, empresas, sistemas e sensores. Com IoT, os dados se tornaram mais acessíveis e ubíquos, o que exige a seleção das abordagens e das ferramentas certas para converter dados em informações úteis e acessíveis (LEE, LAPIRA, *et al.*, 2013). Dessa forma, fazendo uso de dados disponíveis, os gêmeos digitais vinculam o conhecimento teórico aos dados da prática em tempo real e assumem o controle de cadeias inteiras de valor agregado (WARTZACK, SCHLEICH, *et al.*, 2017).

Posto isso, num contexto 4.0, as atividades de garantia da qualidade geométrica do *spool* são suportadas de forma digital, através de ferramentas computacionais, softwares e experimentos virtuais, com o intuito de mitigar e controlar os efeitos das variações geométricas. Para tanto, conforme ilustrado pela Figura 8, as diferentes etapas do processo são conectadas, favorecendo um fluxo contínuo e inequívoco de dados ao longo do ciclo de vida do *spool*.

Figura 8 – Gestão das variações geométricas 4.0.



Fonte: Adaptado de (WARTZACK, SCHLEICH, *et al.*, 2017).

Esse fluxo de dados, informação e conhecimento também pode acontecer no nível entre *spool* e linha (conjunto de *spools* montados) e seus respectivos gêmeos digitais. Dessa maneira, os gêmeos digitais podem ser colocados como facilitadores para a gestão das variações geométricas. Para tanto, o modelo de simulações desenvolvido deve operar, a partir de uma finalidade pré-estabelecida, incorporando modelos da realidade e fazendo uso de dados estruturados, viabilizando um equivalente físico (gêmeo digital) capaz de realizar experimentos virtuais e análises sobre o ambiente físico.

2.3 O GÊMEO DIGITAL

O gêmeo digital¹⁹, às vezes chamado de “gêmeo virtual”, é um equivalente físico e funcional que, hábil para incorporar um modelo da realidade, tem a capacidade de realizar análises e simulações (experimentos virtuais), utilizando dados estruturados relevantes para o processo.

Embora a terminologia²⁰ tenha mudado ao longo do tempo, o conceito básico de um gêmeo digital perdura desde 2002 quando, durante uma apresentação da Universidade de Michigan sobre a construção de um núcleo de Gestão do Ciclo de Vida do Produto (PLM), Michael Grieves apresentou um “ideal conceitual para PLM” (GRIEVES e VICKERS, 2017).

¹⁹ Em sua versão mais usual ou abrangente, o termo é apresentado em inglês como “*digital twin*”.

²⁰ Alguns termos precursores são “*Mirrored Spaces Model*” e “*Information Mirroring Model*” que, em essência, são análogos a “*Digital Twin*” (GRIEVES e VICKERS, 2017).

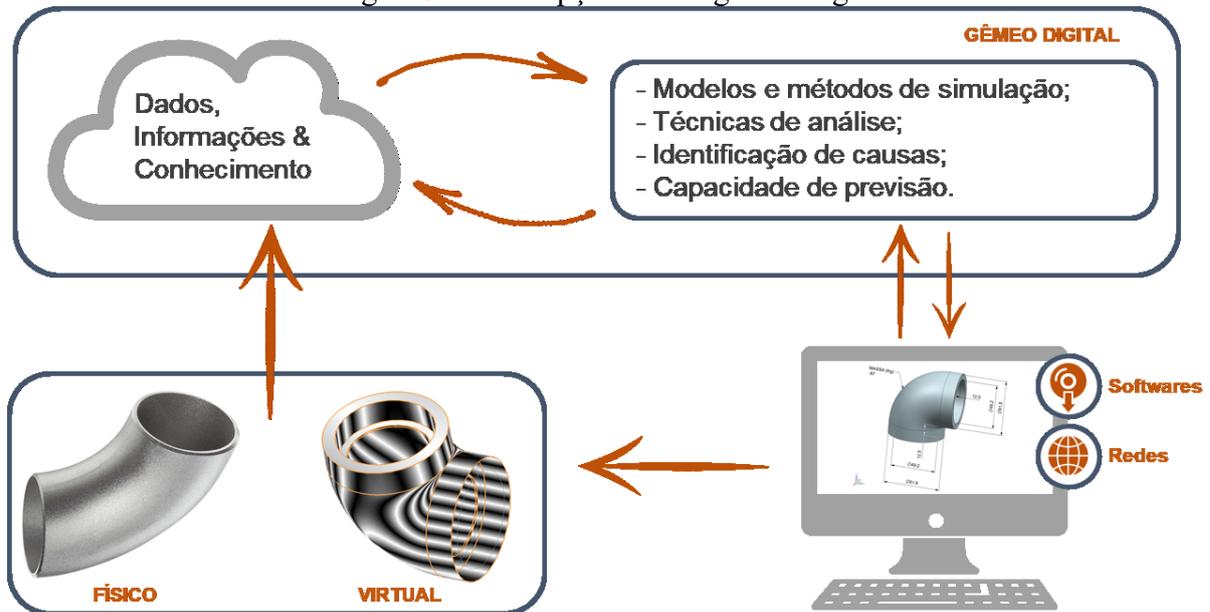
Segundo Grieves e Vickers (2017), a premissa que, à época, guiava o conceito era que cada sistema pode ser desmembrado em dois: um físico, que sempre existiu; e um virtual, que contém informações sobre a entidade física. Assim, existiria um espelhamento ou gemação de sistemas entre o que existe no espaço real (físico) e o que existe no espaço virtual.

O propósito de um gêmeo digital é poder projetar, testar, experimentar, fabricar e, principalmente, obter respostas sobre o espaço físico fazendo uso de um equivalente virtual. De posse dessa cópia digital, é possível compreender se o que fora idealizado na etapa de projeto está em consonância com as demais etapas ao longo do ciclo de desenvolvimento do produto, viabilizando a fabricação e a medição (controle) do produto. Dessa forma, antecipando potenciais problemas, reduzindo custos, tempos e retrabalhos.

As pesquisas, aplicações e publicações relacionadas ao conceito de gêmeo digital foram exploradas de forma mais acentuada pela indústria aeroespacial e aeronáutica. Por exemplo, a visão de um gêmeo digital para otimização de segurança e confiabilidade foi introduzida pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) (GLAESSGEN e STARGEL, 2016). Nos últimos anos, é possível observar a disseminação do conceito para outras áreas, principalmente no setor automobilístico. Já no setor de O&G, embora recentemente tenham surgido fomentos e incentivos que visam a direcionar o setor rumo à transformação digital, ainda não é usual que tecnologias 4.0 sejam aplicadas e não é evidente o uso intensivo de gêmeos digitais nas cadeias produtivas.

A Figura 9 destaca a interação entre as diferentes partes que viabilizam a arquitetura e a evolução de um gêmeo digital. Assim, essa entidade virtual, estabelecida no computador, faz uso de dados e informações como entrada para ferramentas de simulação que, munidas de modelos e técnicas de análises, permitem gerar conhecimento sobre um produto ou sistema.

Figura 9 – Concepção de um gêmeo digital.



Fonte: elaborada pelo autor.

De fato, um gêmeo digital geralmente se refere a uma descrição física e funcional abrangente de um componente, produto ou sistema, que inclui o quão máximo de informações úteis nas fases atuais e subsequentes do ciclo de vida (ROSEN, WICHERT, *et al.*, 2015). Além disso, fazendo eco a Rosen *et al.* (2015), o gêmeo digital é um conceito altamente dinâmico que cresce em complexidade ao longo do ciclo de vida. Assim, a simulação e a transferência contínua de dados entre as fases do ciclo de vida do produto são fundamentais para suportar esse conceito. A conexão e interação entre sistemas favorece a análise de dados para prevenção de falhas, mitigando riscos e custos ao longo do ciclo de desenvolvimento do produto. Para mais, o aumento da disponibilidade de dados também favorece novas possibilidades para melhorias nos sistemas de manutenção e serviços relacionados (ROY, STARK, *et al.*, 2016), o que promove a integração da cadeia de valor, gerando entradas para melhoria contínua de equipamentos e processos, assim como o aumento da segurança operacional.

2.3.1 O gêmeo digital para o projeto de *spools*

O gêmeo digital de *spools* é germinado na etapa de projeto, na qual o produto e o conceito de produção são desenvolvidos. Ou seja, na etapa de projeto, diferentes conceitos de

spools são criados e seus respectivos gêmeos digitais dão suporte para definição dos conceitos de produção correspondentes.

A criação do gêmeo digital na etapa de projeto é importante para assegurar que a qualidade final de um projeto possa ser prevista antes que o produto físico seja fabricado. Para Frankel (2015), isso pode ser realizado construindo um gêmeo digital a partir do dado CAD contendo as informações geométricas necessárias (por exemplo, tolerâncias) e vinculando-o a um software PLM, em que a estrutura do produto na lista de materiais (BOM) e uma descrição básica do processo são apresentadas.

Em função da magnitude e complexidade que envolve um projeto de tubulações industriais, a etapa de projeto alcança uma variedade de conceitos de *spools*, o que muitas das vezes dificulta a tomada de decisão em adotar ou selecionar uma formulação que contemple diferentes critérios envolvidos, levando a trivialidade de algumas soluções, ocasionando em problemas que vão desde a liberação imatura das tubulações para fabricação e montagem até os índices de retrabalho em empreendimentos de O&G.

Dessa forma, na premissa de mitigar o efeito da variação, essa entidade virtual visa a contribuir com o desenvolvimento de projetos robustos, distribuir e validar tolerâncias e, além disso, busca colocar-se à disposição para suportar funcionalidades posteriores ao longo do ciclo de vida do produto. À vista disso, contribui com a validação dos conceitos de *spools*, analisando e otimizando os conceitos para suportar o efeito da variação dimensional no nível dos componentes (tubos, curvas, flanges etc.). Para isso, realizando experimentos virtuais a partir de dados de produção disponíveis e confiáveis.

Quando os critérios relacionados ao conjunto de *spools* montados são conhecidos, o resultado previsto pode ser comparado aos requisitos da linha e a capacidade do processo pode ser determinada. Com isso, ao simular o processo de fabricação e montagem dos *spools*, é possível identificar e solucionar possíveis interferências e, a partir desses resultados, propor modificações no projeto, antes que o *spool* seja fabricado.

Para tanto, os softwares dedicados à simulação dimensional recebem como entrada a variação nos parâmetros de projeto e, a partir disso, seguem o processo de montagem para replicar a fabricação. Essas ferramentas foram desenvolvidas para incluir a natureza das variações dos parâmetros de projeto (por exemplo, o tipo de distribuição estatística) e também para permitir que os valores desses parâmetros variem de forma aleatória, a fim de estimar a variação de desempenho de um requisito funcional do produto durante a etapa de fabricação (BOORLA, BJARKLEV, *et al.*, 2019).

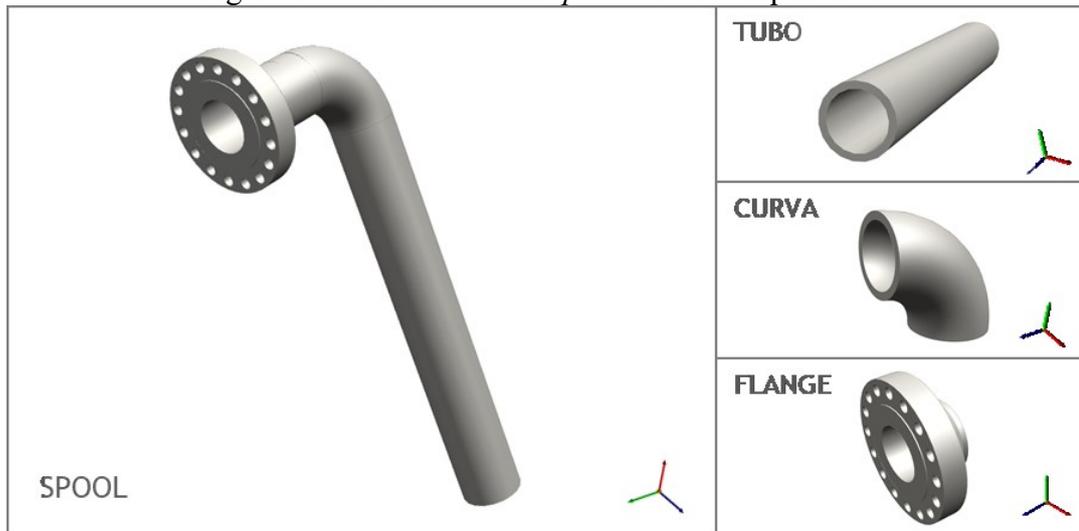
Embora as atividades de garantia da qualidade geométrica sejam necessárias ao longo das diferentes fases do ciclo de desenvolvimento do produto, a criação do gêmeo digital na etapa de projeto é uma ação fundamental para assegurar que as etapas posteriores sejam beneficiadas. Pois, embora essa entidade virtual consuma dados, ela também cria novos dados que contribuem com as etapas de pré-fabricação e fabricação de *spools*.

2.4 OS FATORES QUE IMPACTAM A QUALIDADE GEOMÉTRICA DO SPOOL

Para a indústria de O&G, devido à complexidade de um projeto de tubulações industriais, a qualidade final de uma montagem é fortemente impactada pelo processo de fabricação incorporado no *pipe shop* e altamente dependente de uma vasta gama de parâmetros, critérios e considerações que englobam um empreendimento de processamento de óleo e gás. Todavia, esse discurso não faz eco às práticas atuais da maioria dos estaleiros e fábricas de tubulações nos quais, principalmente no Brasil, não é raro observar problemas de montagem que, se considerados nas etapas de planejamento, evitariam retrabalhos e desperdícios.

A Figura 10 apresenta um modelo de *spool* e seus respectivos componentes. A própria variação de um componente do *spool* – por exemplo, um tubo ou flange ou curva, está relacionada ao processo de fabricação e às propriedades do material que o compõem. Todavia, no nível da montagem, o processo de montagem e o tipo de junta que une os componentes precisa ser modelado, incluindo o número de peças, posições, limites toleráveis, bem como a sequência (ordem) estabelecida. Nesse mesmo sentido, segundo Schleich *et al.* (2018), são diversos os fatores que influenciam na geometria de um produto, incluindo a variação relacionada ao processo de união, as forças adotadas e o efeito do calor.

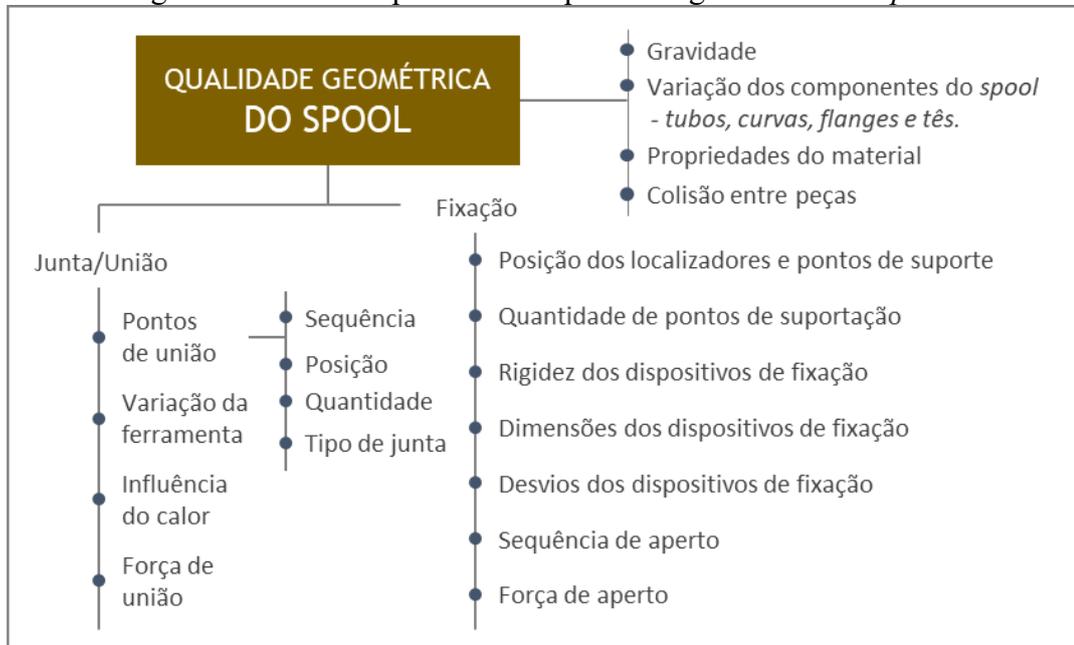
Figura 10 – Modelo de um *spool* e seus componentes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 11 são listados os diversos fatores que afetam a qualidade geométrica de uma submontagem ou de um produto (WÄRMEFJORD, SÖDERBERG, *et al.*, 2016), trazendo uma visão dedicada ao produto *spool*.

Figura 11 – Fatores que afetam a qualidade geométrica do *spool*.



Fonte: Adaptada de (WÄRMEFJORD, SÖDERBERG, *et al.*, 2016).

No entanto, esses fatores de impacto apresentados na figura anterior aproximariam o *spool* a um corpo flexível (não rígido). Mesmo que a assertividade das simulações seja

dependente da inclusão de quantos fatores forem necessários para aproximar o protótipo virtual do produto físico, é importante ressaltar que algumas aproximações realísticas podem ser feitas, não comprometendo a confiabilidade dos resultados obtidos. Ao considerar o *spool* como um sólido flexível, seus componentes assumiriam deformações e, para tanto, seria necessário uma abordagem envolvendo elementos finitos (FEA), trazendo um grau de complexidade ainda maior para as análises executadas nesta pesquisa.

Uma das possibilidades com um modelo FEA, que não é o objeto de interesse deste trabalho, é a capacidade de discretizar a geometria usando um conjunto de elementos finitos reunidos em uma malha, sendo possível calcular e analisar forças e tensões envolvidas, observar o efeito da gravidade e incluir considerações a respeito do calor. No entanto, para os fins que cabem esta pesquisa, as principais premissas dão norte para o modelo: (1) os componentes do *spool* e os elementos de fixação são suficientemente rígidos; (2) cada elemento de fixação é considerado como um ponto de contato sem atrito; e (3) a superfície do corpo do *spool* é considerada lisa.

Estabelecidas essas considerações, para objeto de estudo nesta pesquisa, os principais fatores que afetam a variação geométrica do *spool* e o deslocamento médio de uma submontagem estão relacionados à variação dos componentes do *spool*, ou seja, como uma amostra com tubos, curvas, flanges e conexões em forma de “T” difere da geometria nominal. Para tanto, neste trabalho são adotados dados de tolerâncias dimensionais e geométricas que compõem o *spool* e seus respectivos componentes. Para o processo de união dos componentes do *spool*, são considerados dados de posição, sequência de montagem e pontos de junção.

Assim, a qualidade dimensional do *spool* pode ser elucidada através da ilustração posta na Figura 12, na qual é apresentado um diagrama de causas e efeito relativo aos desvios tridimensionais do *spool* como um corpo rígido. Esses desvios geométricos referidos são aqueles observados no momento em que o *spool* é liberado para montagem no campo, isto é, quando ele sai da fábrica.

Figura 12 – Diagrama de causas e efeito dos desvios geométricos do *spool*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O diagrama apresentado na figura anterior reflete a complexidade dos fatores que levam ao desvio tridimensional do *spool*, ainda que tratado como corpo rígido. No entanto, de posse dos dados que caracterizam os *spool* no nível de seus componentes e suas interações, é possível realizar simulação de variações.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com simulação e dados em tempo real, podemos compensar [desvios geométricos] e otimizar a produção.²¹

Rikard Söderberg

Com base nos antecedentes fornecidos, pode-se observar que as revoluções industriais mudaram a maneira e a importância das atividades relacionadas ao controle e à minimização dos efeitos dos desvios geométricos na qualidade do produto. À vista disso, a quarta revolução industrial vem exigindo, bem como vem impulsionando, novas abordagens, metodologias e ferramentas que lidem com a variação dimensional dos produtos, num contexto (indústria) em que a customização, complexidade e produtividade são essenciais para a competitividade.

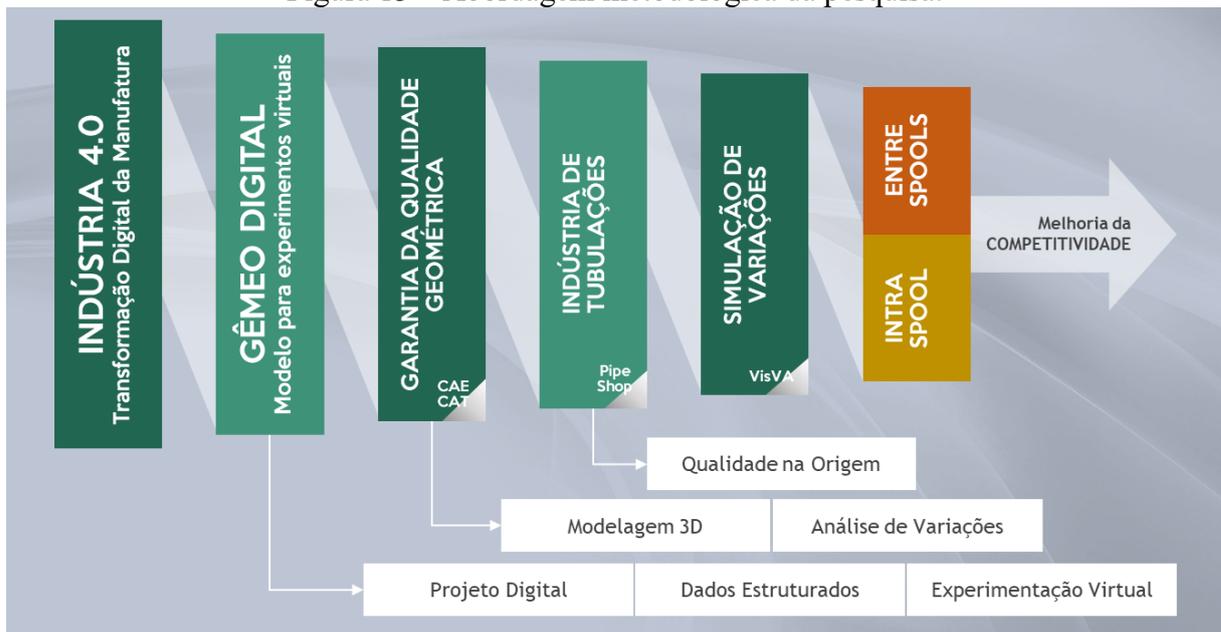
3.1 ABORDAGEM METODOLÓGICA

Para alcançar os objetivos apresentados no Capítulo 1 foi conduzido um plano de experimentação virtual, criando e utilizando um protótipo digital 3D capaz de emular variações dimensionais e geométricas em um ambiente integrado ao ciclo de vida do *spool*.

Para tanto, foram exploradas algumas tecnologias da quarta revolução industrial, levando ao entendimento de que o conjunto de atividades de garantia da qualidade geométrica do produto pode estar associado aos novos rumos da indústria, isto é, a uma manufatura conectada digitalmente, que incorpora modelos da realidade e é capaz de realizar simulações e análises. Dessa forma, conforme ilustrado na Figura 13, este trabalho teve início na transformação digital da manufatura, quando foram exploradas as bases que sustentam o conceito de Indústria 4.0 e suas tecnologias.

²¹ Durante a etapa de definição das possibilidades com esta pesquisa, ouvi esta frase em um *podcast* produzido pela *Chalmers University of Technology*. Esta frase foi provocativa para o estudo apresentado nesta dissertação. Fala original: “*with simulation and real-time data, we can compensate and optimize the production.*” (SÖDERBERG, 2019).

Figura 13 – Abordagem metodológica da pesquisa.



Fonte: elaborada pelo autor.

Da etapa de pesquisa sobre I4.0, foi explorado o conjunto de tecnologias para criação de um gêmeo digital, levando a um estudo sobre a criação de uma cópia digital de um sistema físico, exigindo a busca por conhecimentos sobre digitalização de projeto, estruturação de dados e experimentação virtual.

Em seguida, o foco foi dado às atividades que envolvem o processo de garantia da qualidade geométrica, trazendo à baila os limites e possibilidades de criar um gêmeo digital para descrever um produto de forma física e funcional. Nesse momento, foram estudadas as funcionalidades de ferramentas CAE e CAT, exigindo conhecimentos sobre modelagem 3D (representação abrangente da geometria do produto) para compor o ambiente de simulação de variações.

A partir disso, foi desencadeado um processo de investigação sobre o setor de O&G, levando à pesquisa sobre a cadeia de tubulações industriais. Essa pesquisa exigiu um conjunto de atividades que podem ser descritas principalmente em:

- (1) construção da base do conhecimento a partir de bibliografias, catálogos de fabricantes, documentos e normas vigentes;
- (2) caracterização dimensional de tubos, flanges, curvas e juntas;
- (3) visitas técnicas a *pipe shops* nacionais a fim de elucidar o conhecimento a respeito das práticas atuais de projeto e fabricação.

De posse de um conjunto de informações relevantes, foi feito um plano de experimentação virtual, para investigar o impacto das variações dimensionais e geométricas nos casos “intra *spool*” e “entre *spools*”. O caso “intra *spool*” refere-se às variações durante a fabricação do *spool*, quando os componentes (tubos, curvas e flanges) que o formam são conectados entre si. O caso “entre *spools*” refere-se à capacidade de montagem da linha, isto é, quando os *spools* já foram fabricados e devem ser montados entre si no campo.

Dessa forma, a pesquisa foi estabelecida acerca do conjunto de atividades cujo desenvolvimento ocorre de maneira progressiva e envolvem a:

- Coleta e organização dos conhecimentos disponíveis sobre gestão das variações geométricas, com foco na Indústria 4.0 e no setor de O&G.
- Coleta, armazenamento e estruturação dos dados em um ambiente de gestão do ciclo de vida do produto (PLM), favorecendo o fluxo de informação e conhecimento entre as diferentes etapas de desenvolvimento do produto.
- Criação de um gêmeo digital de *spool*, capaz de incorporar modelos da realidade, hábil a realizar análises e simulações dimensionais (experimentos virtuais), utilizando dados relevantes do processo.
- Criação de uma representação abrangente da geometria do *spool*, desenvolvendo um modelo CAD 3D com base nas definições e especificações descritas nas bases que regem as práticas atuais de projeto e fabricação de tubulações industriais.
- Desenvolvimento de um processo de caracterização dimensional dos componentes do *spool* (tubo, curva e flange) com base nas normas de projeto, fabricação e montagem vigentes, a fim de definir os principais desvios de fabricação desses componentes.
- Planejamento e execução de um conjunto de experimentos virtuais para simular os processos de fabricação e montagem, prevendo quantidades e causas de variação.
- Análise dos resultados obtidos via experimentação virtual, identificando as relações relevantes e os principais agentes de contribuição para a variação, transformando informações em conhecimento para a fábrica (*pipe shop*) e para o campo (empresa contratante).
- Análise crítica da norma vigente, que fixa as condições mínimas exigidas para fabricação e montagem de tubulações metálicas em unidades industriais.

A abordagem metodológica apresentada tem como eixo a transformação digital dos processos industriais com o intuito de promover a melhoria contínua da competitividade. Nesse sentido, a garantia da qualidade geométrica contribui para a melhoria da competitividade da cadeia de tubulações industriais.

3.2 O SOFTWARE ADOTADO PARA SIMULAR VARIAÇÕES

Para simulação computacional foi adotado o software Siemens CAE VisVA™ – *Visualization Variation Systems Analysis*, cujo pacote gráfico executa uma série de experimentos virtuais, com base nas características (*features*) e nos metadados do modelo matemático CAD. O pacote de CAE VisVA™ utiliza técnica estocástica²² de simulação, para prever a totalidade de variações que podem ocorrer numa dada peça ou montagem. A escolha desse software justifica-se por razões como:

- Software comercial com mais de dez anos de atuação no ramo da estatística e da análise de variações dimensionais e geométricas. Ao longo do tempo, consolidando-se como uma ferramenta propícia para simular e analisar variações nos processos de fabricação e montagem.

- Capacidade de admitir arquivo em formato neutro oriundo de qualquer arquivo no formato padronizado de dados JT²³, com ampla aceitação como formato aberto para compartilhamento e visualização de dados 3D;

- Permite rastreabilidade na árvore de modelamento (*model tree*);

- Programação orientada a objetos;

- Permite a distribuição de tolerâncias linear (1D) e espacial (3D), admitindo as características (*features*) geométricas de GD&T;

- Algoritmo de simulação computacional baseado no Método de Monte Carlo;

- Capacidade de simulação da influência do processo de fabricação (sequência de montagem, folgas);

- Capacidade de identificação das contribuições individuais das dimensões (análise de Pareto);

²² O termo está associado à teoria probabilística baseada em eventos aleatórios.

²³ O arquivo do tipo JT, além de apresentar um formato aberto de dados, destaca-se pela alta taxa de compressão, tornando-o mais leve. Desenvolvido pela Siemens, é globalmente utilizado para comunicação, visualização e compartilhamento de dados CAD.

- Permite a determinação dos índices de capacidade que impactam o processo de fabricação e das variações que impactam o projeto.

- É uma ferramenta que, integrada ao Teamcenter[®] (plataforma Siemens PLM) admite uma comunicação com outros *softwares* (CAD, por exemplo), viabilizando o recebimento e envio de dados em um ambiente conectado digitalmente e dedicado à gestão das informações ao longo do ciclo de vida do produto.

A ferramenta VisVA[™] fornece recursos que viabilizam a criação de protótipos digitais dedicados a representar as variações de peças, produtos e processos e, portanto, pode ser usada para: (1) prever as quantidades e causas de variação; (2) validar e otimizar peças, produtos e processos; (3) identificar dimensões críticas para montagem; (4) contribuir com a redução de custos, melhorando a qualidade e assegurando o grau de maturidade do projeto.

Além das justificativas em torno das vantagens operacionais do software adotado, a escolha do VisVA[™] deu-se pela disponibilidade do arquivo CAD e, conforme contextualizado no Capítulo 1, por ser uma ferramenta com a qual esta pesquisa teria a oportunidade de uso.

3.3 DADOS DE ENTRADA PARA CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO 3D

Um gêmeo digital é em essência um modelo virtual que faz uso de dados. Nesse sentido, é importante que os dados de entrada para construção desse modelo estejam organizados e sejam confiáveis.

O protótipo 3D foi construído a partir de um modelo CAD 3D que contempla um conjunto de informações e especificações do produto. Os requisitos de fabricação (dados de tolerância) dos componentes do *spool* foram inseridos no modelo 3D, de tal maneira que permita a reutilização das informações ao longo do ciclo de vida do produto. Em outras palavras, foram armazenadas no arquivo CAD as informações de dimensão e tolerâncias, que tipicamente são adotadas no projeto e fabricação de tubulações industriais.

Para tanto, foram selecionadas algumas normas que direcionaram a construção do modelo virtual de *spool*. As principais normas vigentes adotadas estão descritas no Quadro 2.

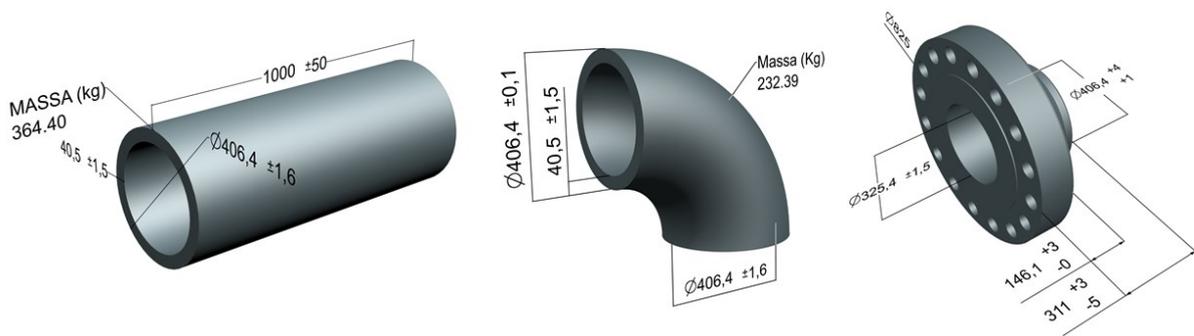
Quadro 2 – Normas vigentes adotadas para construção do protótipo digital.

Norma	Título	Descrição
ASME B16.5 (2017)	<i>Pipe Flanges and Flanged Fittings: NPS 1/2 through NPS 24 Metric/Inch Standard</i>	Esta norma trata das classificações de pressão-temperatura, materiais, dimensões, tolerâncias, marcações e testes para flanges e conexões flangeadas, além de especificar parafusos e juntas.
API Specification 5L (2018)	<i>Line Pipe</i>	Esta norma especifica requisitos de manufatura para produtos de tubulações com e sem costura, para o uso nas indústrias de petróleo e gás natural.
ASME B36.10M (2018)	<i>Welded and Seamless Wrought Steel Pipe</i>	Esta norma trata das dimensões de tubos de aço forjado, com e sem costura, sob altas e baixas temperaturas e pressões.
ASME B16.9 (2018)	<i>Factory-Made Wrought Buttwelding Fittings</i>	Esta norma trata das dimensões gerais, tolerâncias, classificações, testes e marcações de conexões forjadas para solda do tipo topo.
AWS D1.1 (2015)	<i>Structural Welding Code – Steel</i>	Esta norma apresenta requisitos de fabricação e montagem de estruturas de aço soldadas.
PETROBRAS N-57 <i>Público</i> (2017)	Projeto Mecânico de Tubulações Industriais	Esta norma apresenta as condições exigíveis para a execução do projeto mecânico de tubulações industriais em unidades industriais.
PETROBRAS N-115 <i>Público</i> (2016)	Fabricação e Montagem de Tubulações Metálicas	Esta norma trata das condições mínimas exigíveis para fabricação e montagem de tubulações metálicas em unidades industriais.

Fonte: elaborado pelo autor.

De posse das informações obtidas via normas e documentos relevantes para projeto, fabricação e montagem de tubulações industriais, foi possível inseri-las digitalmente no protótipo virtual. Na Figura 14 é possível observar algumas das anotações 3D que o modelo carrega. Essas informações são fundamentais para que as simulações e análises sejam realizadas conforme esperado.

Figura 14 – Dados de dimensão e tolerância inseridos no protótipo digital.



Fonte: elaborada pelo autor.

Cabe ressaltar que foram adotados dados de dimensão e tolerância para compor o protótipo 3D, pois esta pesquisa não teve acesso aos dados da capacidade do processo de fabricação do *pipe shop* ou estaleiro. No entanto, para o que se propõem o estudo aqui discorrido, a ausência dos dados da capacidade da fábrica não traz prejuízos para as análises.

Com base no que fora descrito na seção 2.4 e nos dados disponíveis de dimensão e tolerância dos *spools* e seus respectivos componentes, foi feito um memorial descritivo com os principais desvios de fabricação, que podem ser visualizados no Quadro 3.

Quadro 3 – Desvios relevantes de fabricação.

Tubos	Curvas	Flanges
Comprimento entre faces	Distância entre linha de centro e face	Comprimento do cubo
Diâmetros (externo e interno)	Diâmetros (externo e interno)	Diâmetros (externo e interno)
Perpendicularidade das faces	Perpendicularidade das faces	Perpendicularidade das faces
---	---	Excentricidade do padrão de furos
---	---	Espessura

Fonte: elaborado pelo autor.

Apresentados os desvios relevantes que serão contemplados para análise de variações, fica evidente que, embora a diversidade de *spools* seja excessiva e desmedida, a variedade de componentes do *spool* é mais limitada e, num nível ainda mais finito, a

diversidade de juntas e, também, a variedade dos principais agentes contribuintes para variação.

A caracterização dimensional dos componentes e do *spool* foi essencial para delimitar as entradas que integram o modelo de análise de variações, mas também serviu para observar como as normas e documentos que regem o projeto, fabricação e montagem de tubulações industriais tratam as especificações dimensionais e geométricas. Cabendo, portanto, um apontamento crítico a respeito, que está descrito no Capítulo 6.

Para além das premissas e considerações a respeito do *spool*, trazendo simplificações que viabilizam a construção do modelo de simulação de variações, é válido ressaltar que a proposta de um gêmeo digital traz vitalidade ao modelo, tornando-o capaz de incorporar novos dados ao longo da sua maturidade e, dessa forma, deixando-o cada vez mais próximo daquilo que se espera como realidade.

4 EXPERIMENTAÇÃO VIRTUAL

*O mundo é complexo demais para prevermos a infinitude de coisas que podem acontecer.*²⁴

Gustavo Donatelli

Do que fora visto até aqui, a proposta de um gêmeo digital para garantia da qualidade geométrica das tubulações industriais fornece suporte ao processo de desenvolvimento de *spools*, permitindo a previsão dos efeitos dos desvios dos componentes nas características do conjunto, sem a necessidade de protótipos físicos de alto custo. Além disso, a qualidade do *spool* pode ser virtualmente avaliada, controlada e melhorada, tornando os produtos mais robustos e menos sensíveis à variação da fabricação. Assim, neste capítulo é apresentado o uso dos *spools* de teste para experimentação virtual em um ambiente integrado ao ciclo de vida do produto, o protótipo digital 3D desenvolvido e o plano experimental adotado para compor o estudo de análise de variações.

4.1 OS SPOOLS DE TESTE

Os *spools* de teste foram modelados com base nas normas e definições descritas no Capítulo 3. Para tanto, foi selecionado para o estudo de impacto das variações dimensionais um conjunto de *spools* que apresenta características relevantes para o setor de O&G, em função de suas características construtivas, material, geometria e tipo de junta.

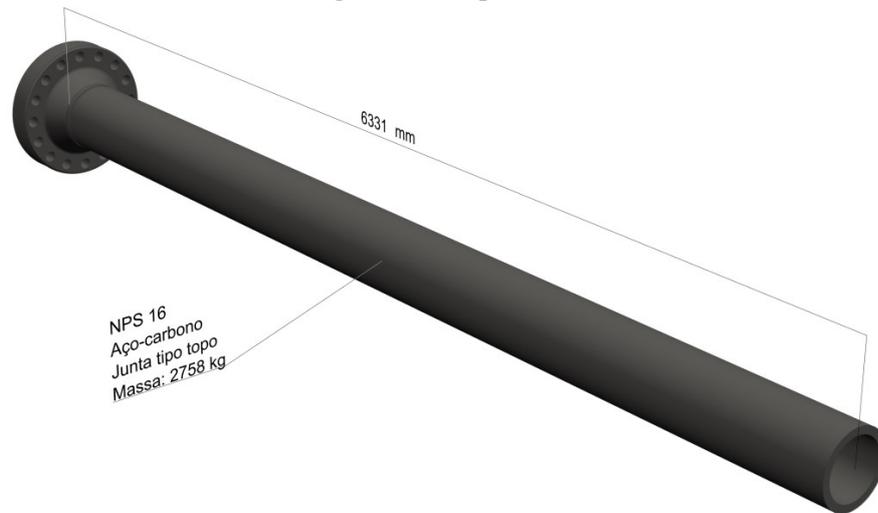
Os *spools* de teste apresentam diâmetro externo nominal de 16" (NPS 16), são confeccionados em aço-carbono e suas juntas são do tipo topo. Esses *spools* apresentam características de interesse como objetos de estudos para transformação digital por serem representativos²⁵, em termos quantitativos, em empreendimentos de O&G.

As tubulações selecionadas foram identificadas como Spool-1D, Spool-2D e Spool-3D. O primeiro, ilustrado na Figura 15, apresenta apenas um tubo e um flange.

²⁴ Resposta que tive do orientador desta pesquisa quando, após um longo processo investigativo, lamentei a impossibilidade de criar um protótipo digital capaz de incorporar e prever o mundo físico.

²⁵ A abrangência das tubulações selecionadas pode ser identificada em Telles (2001).

Figura 15 – Spool-1D.



Fonte: elaborada pelo autor.

O Spool-2D, ilustrado na Figura 16, apresenta mais de um tubo, um flange e uma curva. Por conter uma curva dentre os seus componentes, essa tubulação apresenta uma derivação a mais que o primeiro *spool* e, portanto, condicionando o fluxo em duas direções.

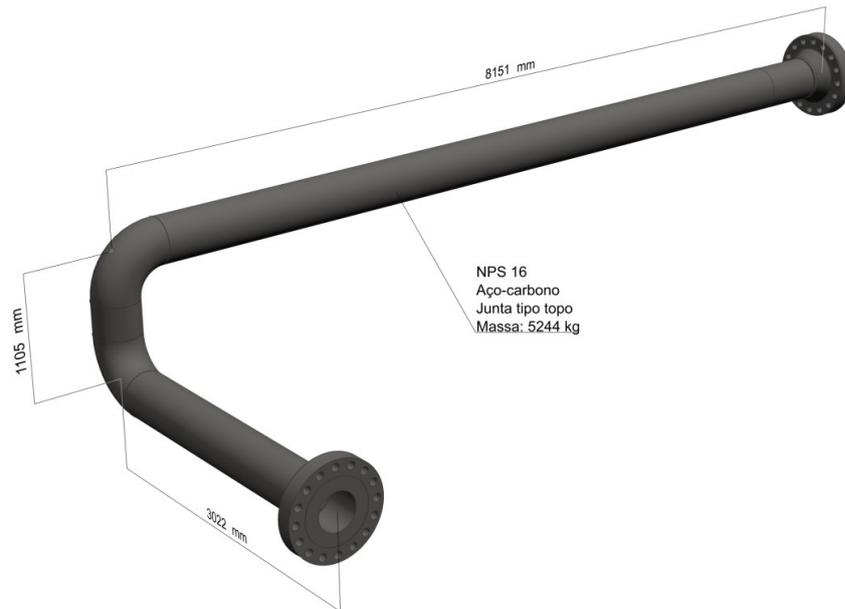
Figura 16 – Spool-2D.



Fonte: elaborada pelo autor.

Dentre os *spools* selecionados, o Spool-3D, ilustrado na Figura 17, apresenta maior complexidade. Essa tubulação contém mais de um tubo, com diferentes tamanhos (comprimentos), dois flanges e mais de uma curva. Dessa forma, no Spool-3D, o fluxo é condicionado em três direções.

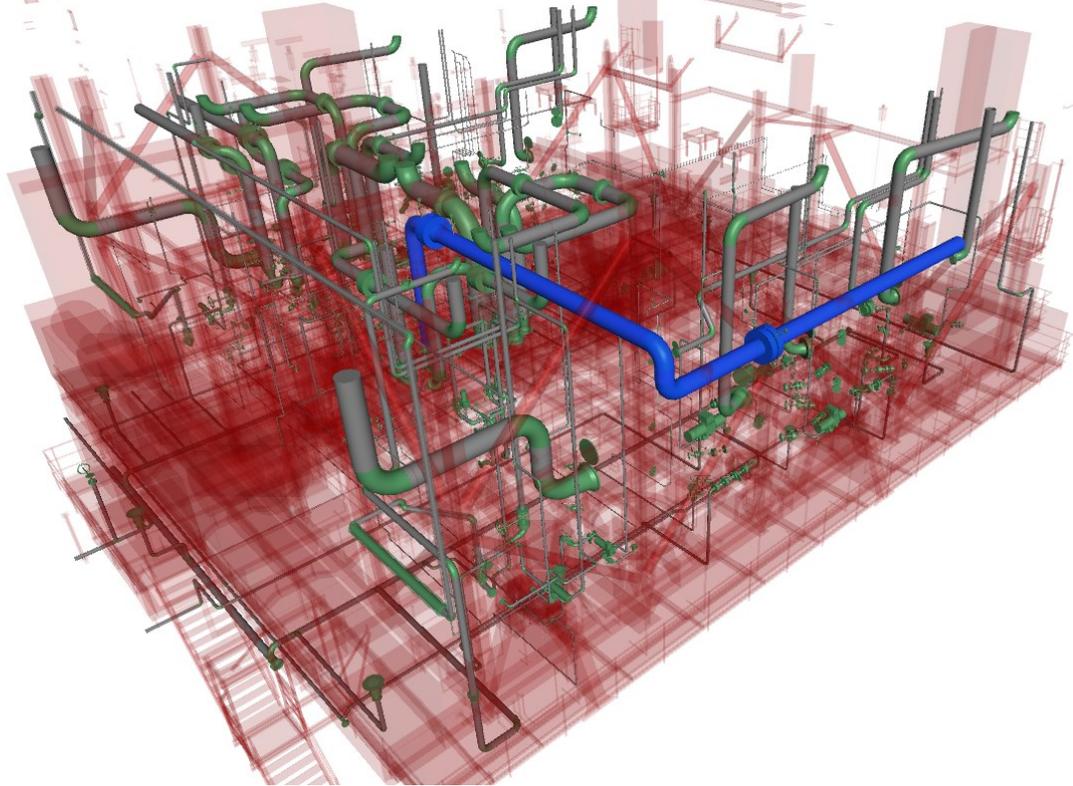
Figura 17 – Spool-3D



Fonte: elaborada pelo autor.

Esses *spools*, identificados como Spool-1D, Spool-2D e Spool-3D, quando montados entre si através de flanges e fixadores, constituem um conjunto que forma uma linha de tubulações. Essa linha faz parte de um módulo real que compõe uma planta numa FPSO, para processamento primário do petróleo. Essa FPSO, operante nos dias de hoje, não é apresentada em detalhes nesta dissertação para fins de confidencialidade. A Figura 18 apresenta os *spools* de teste (destacados em azul) montados entre si em um dos módulos que configuram uma FPSO.

Figura 18 – *Spools* de teste montados virtualmente – linha de tubulações.



Fonte: elaborada pelo autor.

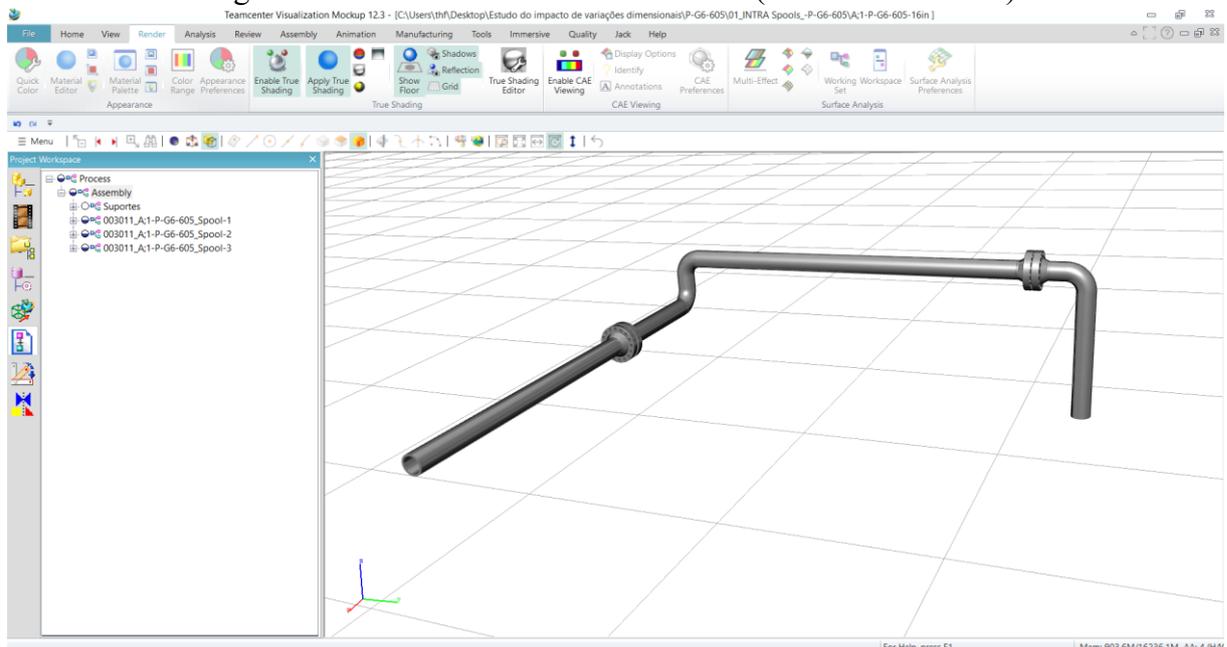
Ao observar uma fração de uma instalação industrial, é reforçada a magnitude do impacto das variações e os potenciais ganhos em mitigar os efeitos das variações dimensionais. De fato, os *spools* selecionados para testes em uma plataforma de experimentação virtual, embora apresentem dimensões expressivas, fazem parte de um contexto ainda maior, com outras linhas, vários sistemas e equipamentos.

4.2 MODELAMENTO E SIMULAÇÃO

Os *spools* de teste foram modelados no software CAD Siemens NX™, integrado ao ciclo de vida do *spool*. Isto é, os modelos 3D dos *spools* de teste apresentados e seus respectivos componentes (tubos, curvas e flanges) foram gerados em uma plataforma de gestão do ciclo vida do produto (Teamcenter® – Siemens PLM), favorecendo o fluxo de dados, informações e conhecimentos entre as diferentes etapas de desenvolvimento do produto e beneficiando os meios de simulação. Os respectivos componentes de cada *spool* de teste podem ser visualizados no Apêndice B.

De posse do modelo matemático CAD, contendo um conjunto de informações e especificações necessárias para simulação dimensional, foi feita a importação do mesmo (em formato JT) para a ferramenta de simulação VisVA™, dando início ao processo de criação do protótipo digital de análise de variações. Na Figura 19, é possível observar a interface do software VisVA™ no momento em que foram importados os *spools* de teste, incluindo os componentes de cada um dos *spools* para uso nos diferentes níveis de montagens e submontagens.

Figura 19 – Interface do software adotado (Siemens VisVA™).



Fonte: elaborada pelo autor.

Embora não seja uma necessidade o uso do modelo CAD para iniciar o desenvolvimento de um protótipo digital de análise de variações, foi escolhido usar o dado CAD a fim de criar um modelo de variações que contemple uma representação abrangente da geometria dos *spools*. Além disso, conforme descrito na seção 3.3, a proposta de um gêmeo digital envolve o uso e a disponibilidade de dados confiáveis e estruturados, o que se torna mais conveniente em um modelo matemático CAD.

4.2.1 O modelo de análise de variações

Ao importar o arquivo CAD para a ferramenta VisVA™, o modelamento foi iniciado, com foco no estudo de impacto das variações. Para tanto, com o auxílio da

geometria 3D, foram selecionadas as *features* de interesse que representam, da forma o quão mais abrangente, a geometria dos componentes do *spool*. Essas *features* são características relacionadas à geometria e, sendo assim, consomem os dados de dimensão e tolerância, essenciais para o desenvolvimento da simulação. O Quadro 4 apresenta a sequência de atividades adotadas para construção do modelo de VA.

Quadro 4 – Fluxo de atividades para construção do modelo de VA.

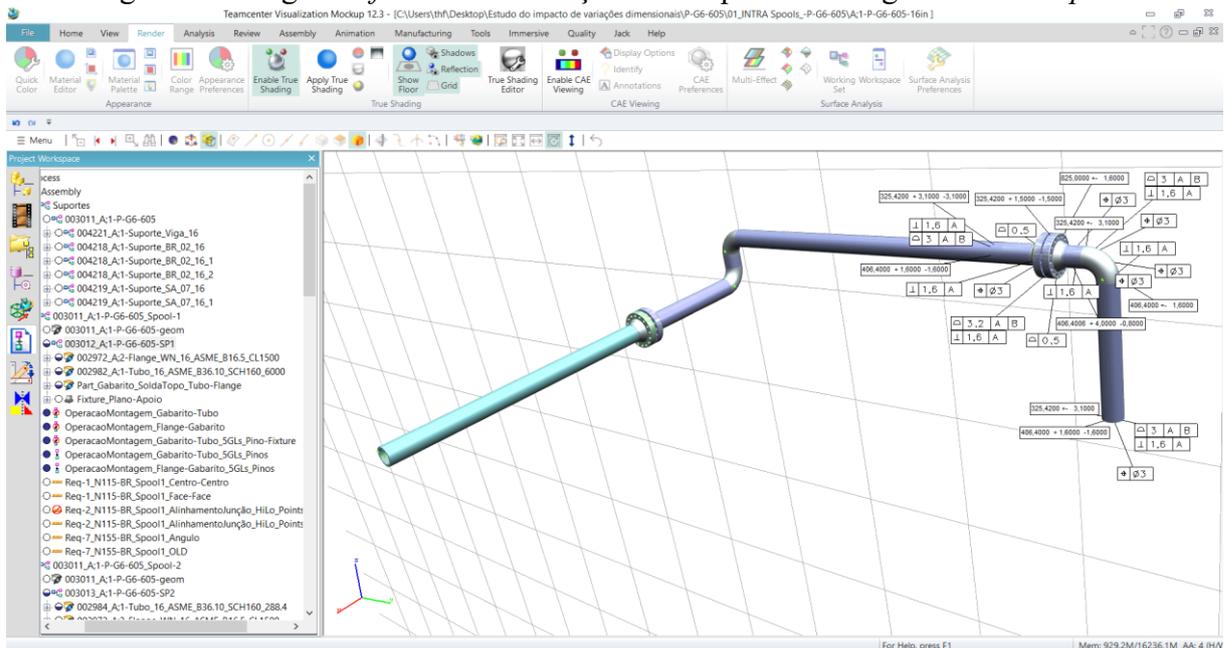
Atividade	Descrição
1	Definição e criação das <i>features</i> que representam a geometria do componente
2	Inclusão das tolerâncias dimensionais e geométricas nas <i>features</i> criadas
3	Definição da sequência de montagem entre os componentes
4	Definição das operações de montagem entre as <i>features</i> dos componentes
5	Inclusão das <i>features</i> de movimento (componentes que são movidos)
6	Definição das operações de simulação
7	Inclusão dos limites inferiores e superiores de simulação
8	Inicialização da simulação

Fonte: elaborado pelo autor.

Para cada contato entre componentes do *spool*, foi desenvolvida uma operação de montagem correspondente (vide Apêndice C) em que os limites toleráveis correspondentes aos desvios dimensionais e geométricos das juntas do tipo topo são contemplados.

Haja vista que o modelo CAD possui o conjunto de informações úteis para análise de variações, os dados de tolerância também são armazenados no modelo de análise de variações. A título de ilustração, a Figura 20 destaca uma parte desse modelo, contendo algumas *features* que acompanham a geometria dos componentes do *spool*, bem como algumas das anotações 3D úteis para simulação.

Figura 20 – Algumas *features* e anotações correspondentes à geometria do *spool*.

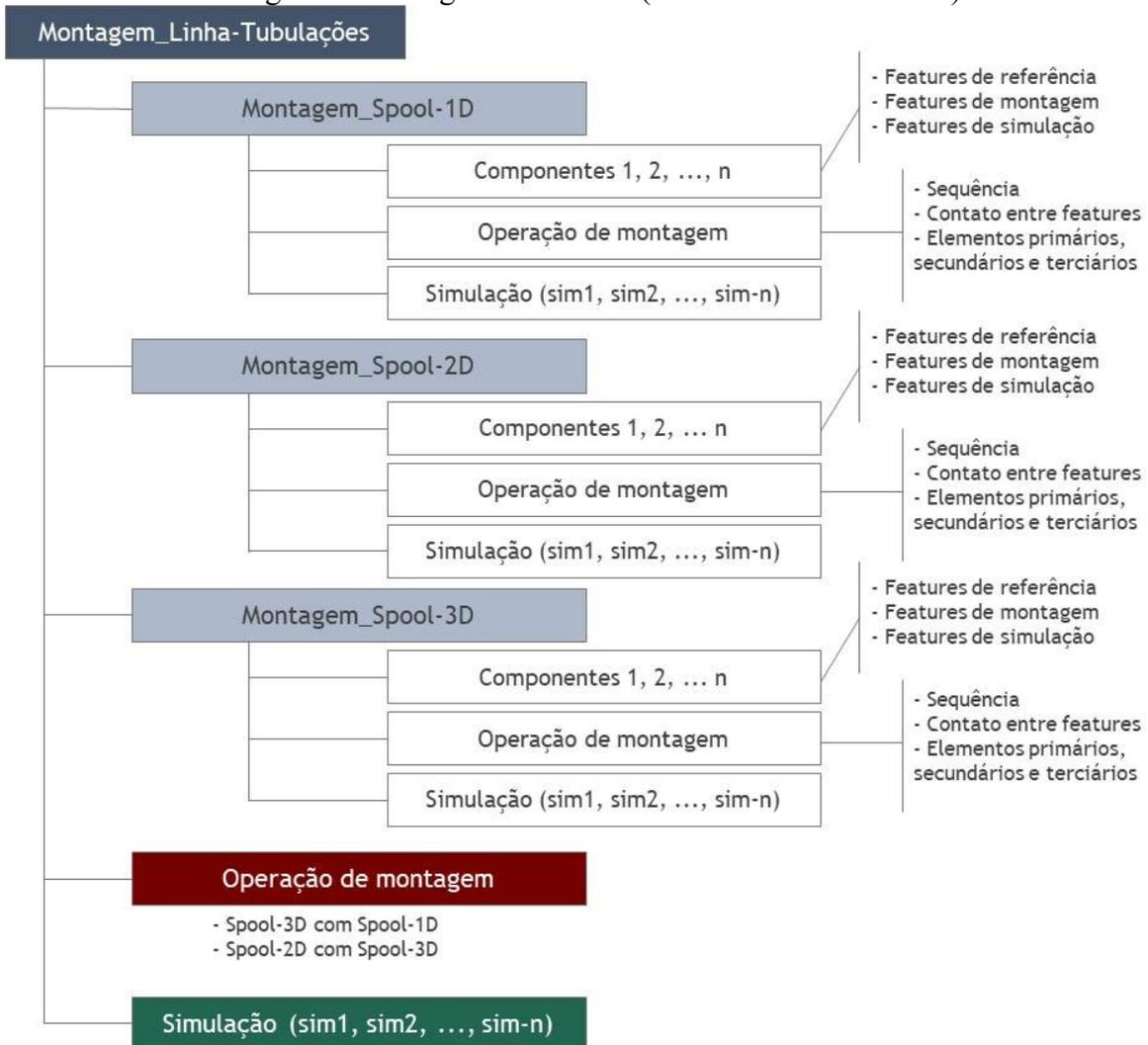


Fonte: elaborado pelo autor.

O VisVATM é uma ferramenta de programação orientada a objetos. Ao definir os componentes do *spool* que farão parte das análises e seus respectivos grupos, dá-se a formação da família de peças, composta pelas respectivas *features* e dados geométricos. Essas famílias de componentes dos *spools* compõem a montagem do conjunto, no nível *spool* e no nível linha de tubulações. A árvore de modelamento, também denominada de *model tree*, é constituída essencialmente de dados referentes ao toleranciamento, permitindo rastreabilidade das informações e dos comandos adotados.

O desenvolvimento de um diagrama de fluxo de montagem é importante para estabelecer uma melhor compreensão sobre as entradas necessárias (e saídas esperadas) para o modelo de análise de variações. Esse diagrama foi expandido para incluir os tipos de *features* necessárias para as operações de montagem de cada *spool*, bem como para os dispositivos de fixação. A Figura 21 ilustra o diagrama desenvolvido.

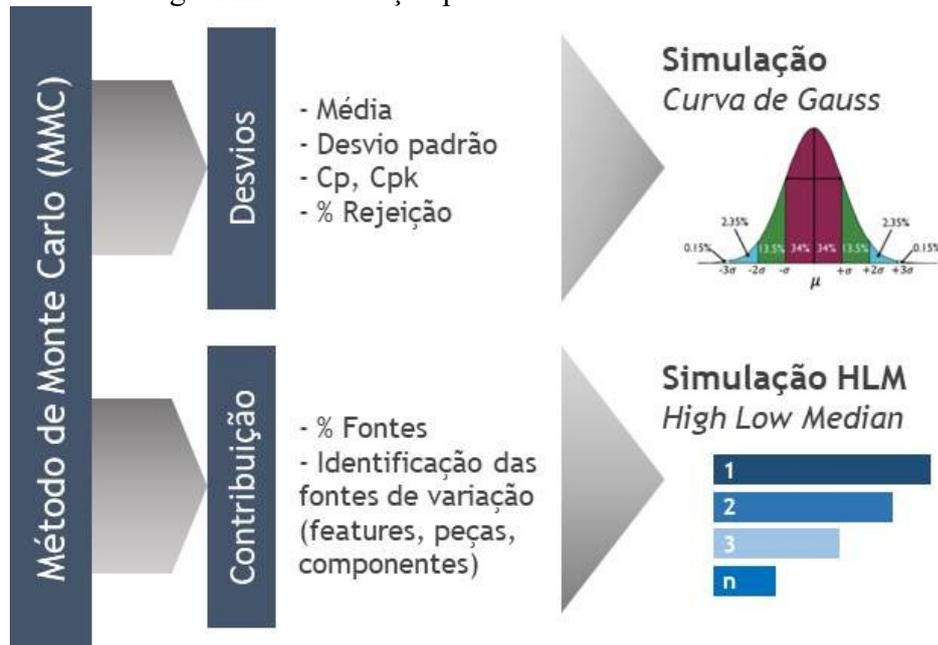
Figura 21 – Diagrama de fluxo (árvore de modelamento).



Fonte: elaborada pelo autor.

O modelo desenvolvido faz uso de simulação estatística pelo Método de Monte Carlo (MMC). Ao iniciar uma simulação, o protótipo digital 3D de análise de variações faz uso dessa técnica estocástica, a fim de prever a totalidade de variações que podem ocorrer, na medida em que os *spools* e seus componentes são unidos entre si. A simulação de Monte Carlo é considerada uma réplica realista da produção em massa (YAN, WU e YANG, 2015). A Figura 22 ilustra o MMC e as saídas esperadas a partir da distribuição resultante.

Figura 22 – Simulação pelo método de Monte Carlo.



Fonte: Adaptada de (CAMARGO, 2010).

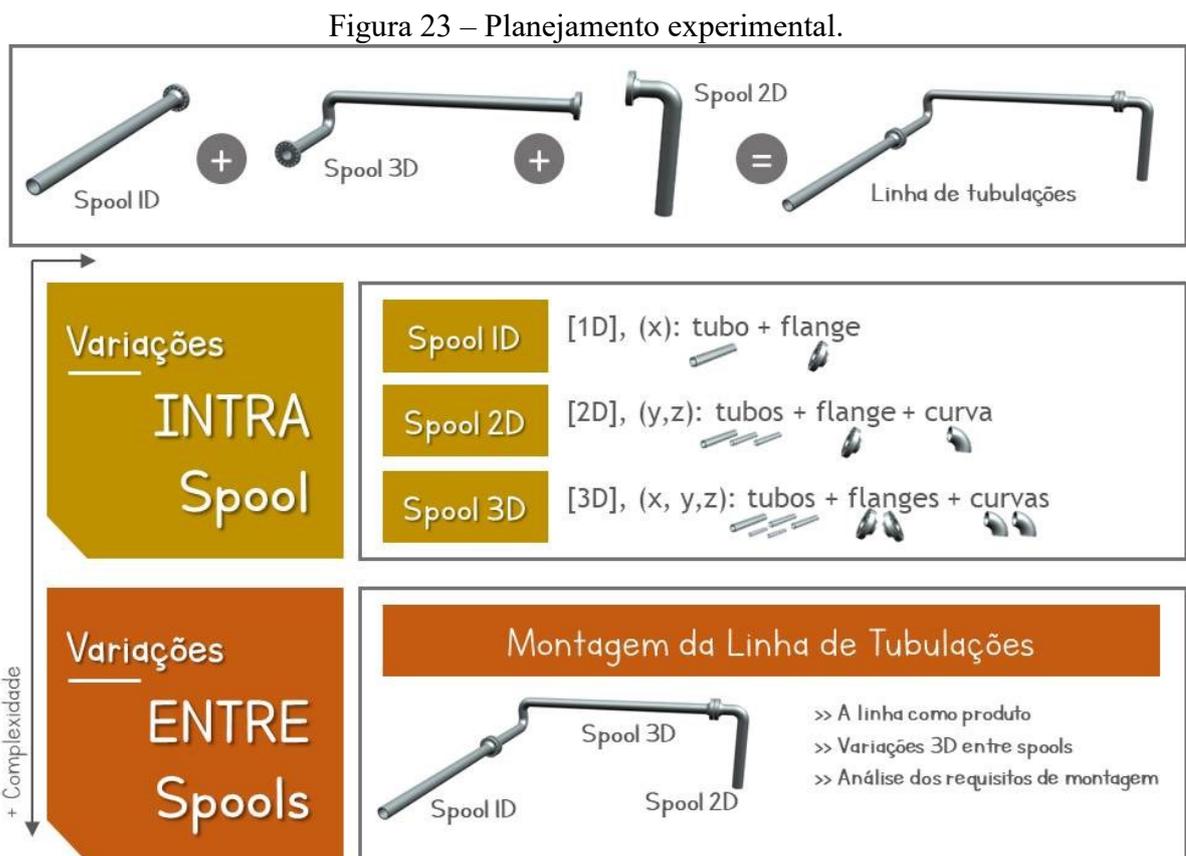
O MMC adota uma quantidade massiva de repetições para gerar resultados estatísticos representativos. Para tanto, são atribuídas variáveis aleatórias às quantidades de interesse e, através de um modelo matemático, calculadas as respectivas respostas (ALBERTAZZI e SOUZA, 2018). No contexto de garantia da qualidade geométrica dos *spools*, o intuito do uso do MMC é avaliar os efeitos das diversas fontes de variação que, de forma simultânea, atuam sobre o processo de fabricação e montagem das tubulações industriais.

A distribuição resultante – *high low median* (HLM) obtida pela simulação, é usada para conhecer a porcentagem de rejeição de montagem (virtual) e as fontes de contribuição para variação. Como principais resultados e indicadores, o protótipo digital de análise de variações apresenta: função densidade da distribuição, média, desvio padrão e índices de capacidade.

4.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental foi desenvolvido para testar que, de posse de um gêmeo digital para garantia da qualidade geométrica, é possível prever e observar o impacto da variação na qualidade dimensional de tubulações industriais.

Para o estudo proposto, foram selecionadas duas frentes de trabalho: (1) variações *intra spool*; (2) variações *entre spools*. A primeira trata das variações que ocorrem no nível do *spool* (no singular), como uma entidade individual, que tem suas variações combinadas na medida em que os componentes são montados entre si. A segunda trata das variações que ocorrem no nível da linha, ou seja, quando os *spools* (no plural) são conectados e fixados entre si. A Figura 23 ilustra o plano experimental adotado.



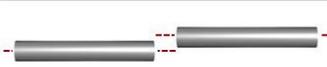
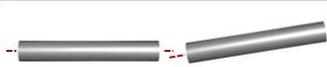
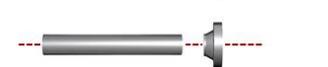
No caso *intra spool*, é possível observar que a complexidade dos testes aumenta, na medida em que a quantidade de componentes envolvidos vai aumentando. No caso *intra*, cada uma das tubulações é tratada como um produto final, ou seja, cada um dos *spools* é tratado como um produto que deve ter a sua qualidade geométrica assegurada. Os resultados e análises oriundos do caso *intra* despertam maior interesse no fabricante de tubulações industriais.

No caso *entre spools*, a linha é tratada como produto e o acúmulo das variações ocorre na medida em que os *spools* são conectados uns aos outros. A estratégia adotada para

observar os efeitos das variações dimensionais e geométricas foi realizar experimentos virtuais com base na operação de montagem que ocorre no campo, isto é, na FPSO. Portanto, no caso *entre*, a qualidade geométrica da linha deve ser assegurada.

Para compor os experimentos, conforme ilustrado na Figura 24, os desvios típicos que ocorrem entre os componentes das tubulações foram considerados, com base nas faixas de variação aceitáveis apresentadas em normas e documentos vigentes.

Figura 24 – Desvios típicos em tubulações industriais.

Componentes	Alinhamento Nominal	Desvio Excentricidade	Desvio Angular
Tubo vs. Tubo			
Tubo vs. Curva			
Tubo vs. Flange			
Flange vs. Flange			

Fonte: elaborada pelo autor.

Assim, durante as análises foram avaliados os desvios associados à dimensão, à orientação e à localização dos componentes dos *spools* de teste. Embora a ilustração da Figura 24 apresente de forma individual uma síntese dos principais desvios entre componentes, é de fundamental importância destacar que, na prática, esses desvios acontecem de forma combinada.

Cabe ressaltar que não foram estudados os efeitos dos desvios de forma dos componentes dos *spools*, porque esse tipo de análise não é objeto de muita atenção (ou interesse) no contexto de tubulações industriais. Também, não foi estudado o efeito do desvio de rotação do flange em uma direção, sendo considerada constante a posição do padrão de furos entre flanges que serão montados entre si – ou seja, não foi analisado o desalinhamento dos furos por rotação do flange em relação à posição nominal.

De posse do fluxo de montagem, das relações estabelecidas entre cada uma das peças (montagens e submontagens) e dos dados de tolerância que compõem cada uma das peças incluídas no modelo – o gêmeo digital de análise de variações, fazendo uso de um conjunto de informações úteis para o processo, é capaz de gerar novos dados e informações para prever se há algum problema de montagem, antes que a peça física seja fabricada. Esse modelo também

identifica as causas básicas dos problemas de fabricação e permite que o projeto, as tolerâncias e a operação de montagem sejam melhorados.

Para tanto, as simulações desenvolvidas são estabelecidas em um formato no qual são incluídas as “perguntas” que serão feitas ao gêmeo digital e, como saídas, as respectivas respostas (resultados).

4.3.1 Configuração de simulação

A interface da ferramenta de VA possibilita um conjunto de animações que ajudam o usuário a visualizar e compreender os problemas de montagem durante a simulação. Essa estratégia foi adotada para observar as relações (cinemáticas) entre componentes e, dessa forma, validar a programação descrita na árvore de modelamento.

As simulações foram configuradas para que os relatórios obtidos apresentem a porcentagem com que cada um dos componentes do *spool* contribui para variação total, envolvendo os dados de tolerância que incluem localização, tamanho e orientação.

O número (n) de repetições durante uma simulação está associado à qualidade dos resultados esperados. Para tanto, foi adotado $n = 2,2 \cdot 10^5$, pois dessa forma a probabilidade de abrangência desejada é da ordem de 95,45%. Matematicamente, essa solução pode ser expressa pela equação 1 (ALBERTAZZI e SOUZA, 2018).

$$n = \frac{1}{1 - PA} \cdot 10^4 \quad (1)$$

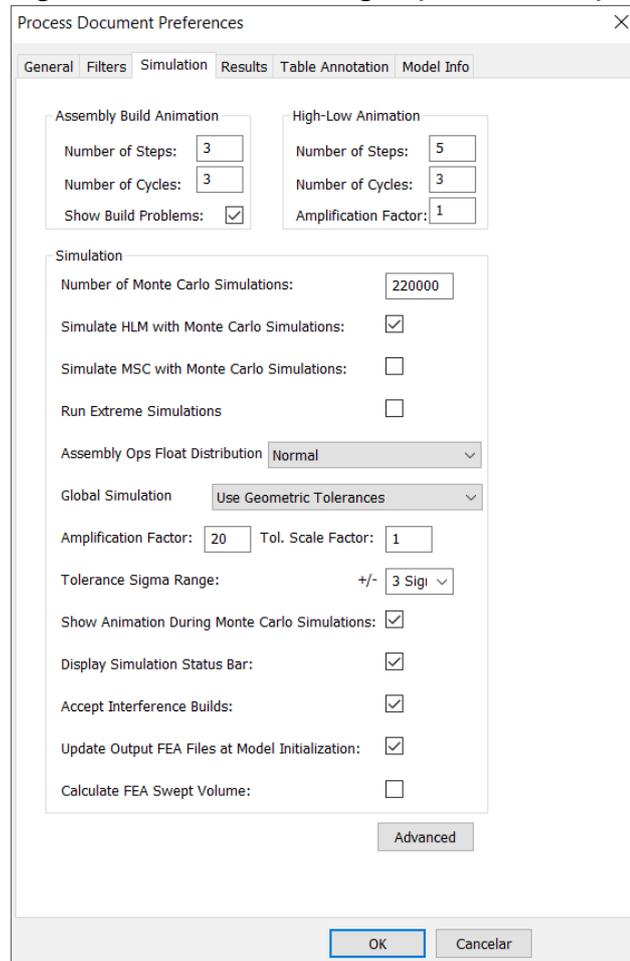
Sendo:

n número mínimo de simulações recomendado para o MMC;
 PA probabilidade de abrangência desejada (nível de confiança).

Para composição dos histogramas, foram adotados os limites $\pm 3\sigma$, para avaliar a consistência (previsibilidade) do respectivo processo em análise, a qual denota uma condição a ser atendida para a posterior análise de capacidade.

A Figura 25 apresenta a janela de configuração da simulação, na qual as principais considerações descritas nesta seção estão assinaladas.

Figura 25 – Janela de configuração da simulação.



Fonte: elaborada pelo autor.

Para exprimir numericamente a capacidade do processo, foram adotados os índices C_p e C_{pk} que, respectivamente, correspondem à capacidade bilateral e à capacidade para processos não centrados. Esses índices foram adotados por utilizarem a variabilidade de curto prazo, na qual se manifestam apenas a variação inerente ao processo (causas comuns). O índice de capacidade bilateral resulta da divisão expressa pela equação 2.

$$C_p = \frac{IT}{6 \cdot s} \quad (2)$$

Sendo:

- C_p índice de capacidade bilateral;
- IT intervalo de tolerância (diferença entre os dois limites de tolerância);
- s estimativa do desvio padrão.

Na medida em que a dispersão do processo diminui, o índice C_p aumenta e, portanto, aumenta a capacidade do processo. Para avaliação do cálculo do índice, foi considerado que o processo é incapaz se $C_p < 1$; o processo é marginalmente capaz se $1 \leq C_p \leq 1,33$; e o processo é capaz se $C_p \geq 1,33$. Esse critério geralmente é adotado pelas indústrias²⁶.

O índice C_{pk} é adotado para avaliar processos em que a distribuição não está centrada – isto é, quando a média está deslocada para uma das extremidades do campo de tolerâncias. Em outras palavras, o índice C_{pk} leva em consideração não somente a variabilidade do processo, mas também a sua localização com relação aos limites toleráveis. Para avaliação do cálculo do índice, foi considerado que o processo é incapaz se $C_{pk} < 1$; o processo é marginalmente capaz se $1 \leq C_{pk} \leq 1,33$; e o processo é capaz se $C_{pk} \geq 1,33$. A justificativa desse critério faz eco a que fora estabelecida para o índice C_p . O índice de capacidade para processos não centrados resulta da equação 3.

$$C_{pk} = \text{mínimo} \left(\frac{\bar{x} - LIT}{3 \cdot s}, \frac{LST - \bar{x}}{3 \cdot s} \right) \quad (3)$$

Sendo:

C_{pk}	índice de capacidade para processos não centrados;
\bar{x}	estimativa da média;
LIT	limite inferior do campo de tolerância;
LST	limite superior do campo de tolerância;
s	estimativa do desvio padrão.

De posse da configuração adotada, as simulações foram iniciadas conforme planejamento experimental e, dessa forma, trazendo informações úteis que podem formar conhecimentos para as distintas etapas que envolvem o ciclo de vida dos *spools*.

²⁶ O critério $C_p = 1,33$ corresponde à probabilidade de produzir 63 peças fora dos limites de tolerância a cada amostra contendo 1 milhão de peças. Ver Montgomery e Runger (2013).

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

*A melhor análise é a mais simples: aquela que oferece o entendimento necessário.*²⁷

Donald Wheeler

Para simulação das variações, foram selecionados os requisitos 1, 2 e 7 descritos na norma pública PETROBRAS N-115 (PETROBRAS, 2016). O Anexo A destaca uma imagem dessa norma, na qual estão apresentados esses requisitos e a maneira como esse documento especifica as tolerâncias.

Nesse sentido, os requisitos de interesse para análise nesta dissertação estão descritos ao longo do texto como *Req-1*, *Req-2* e *Req-7* e tratam, respectivamente, da distância face a face dos *spools*, do alinhamento da junção e do ângulo de inclinação do flange em relação à linha de centro da tubulação. Os resultados obtidos são percorridos a partir das curvas de distribuição que descrevem o comportamento do processo e, também, dos relatórios que descrevem os agentes de contribuição para variação. Cabe destacar que no Apêndice D é apresentada a totalidade dos resultados obtidos correspondentes aos percentuais que envolvem esses agentes, no entanto, nas seções seguintes, são apontados e discutidos apenas os principais contribuintes da variação total.

5.1 VARIAÇÕES INTRA SPOOL

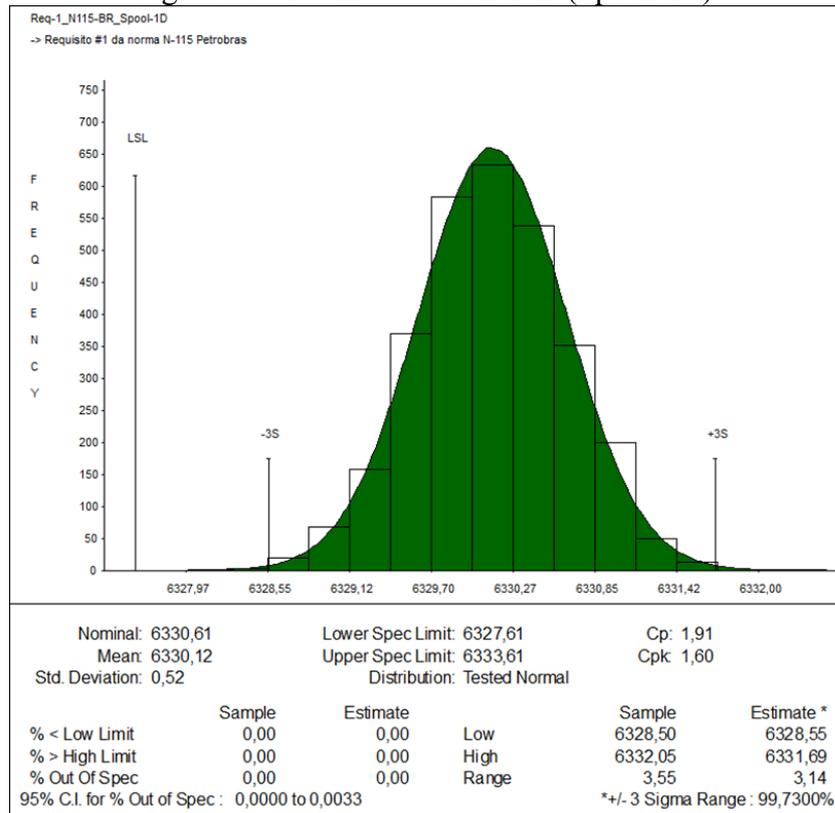
5.1.1 Spool-1D

Para a primeira análise foi escolhido o Spool-1D que, dentro do conjunto de *spools* de teste, apresenta uma geometria mais simplificada, por ter menos componentes e por não conter derivações – isto é, o fluxo que escoar pelo Spool-1D é condicionado em apenas uma direção axial.

A Figura 26 apresenta o resultado obtido para simulação do *Req-1*, que trata da distância face a face entre as extremidades do tubo e do flange.

²⁷ Durante o planejamento experimental, surgiram diversos questionamentos sobre a completude e abrangência dos resultados numéricos que seriam obtidos. No entanto, o que balizou as análises nesta pesquisa foi assumir a ideia de que as simulações concebidas devem ser viabilizadoras de um entendimento de maior alcance – isto é, fomentando contribuições para o estado da arte. Ver Wheeler (1993).

Figura 26 – Distância face a face (Spool-1D).



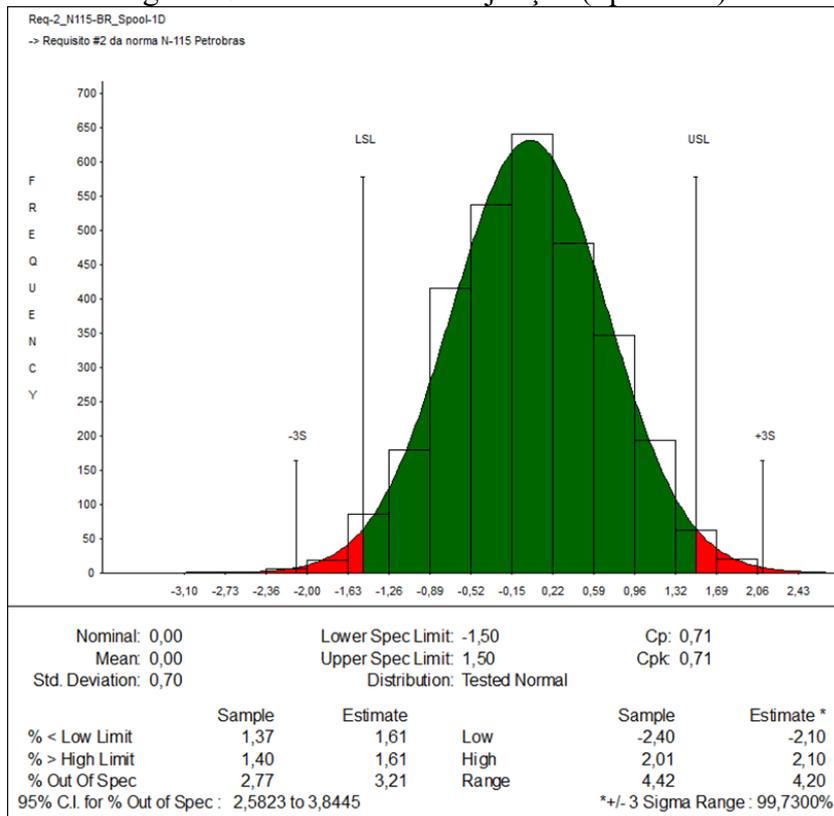
Fonte: elaborada pelo autor.

Da Figura 26 destaca-se que o processo é capaz, por apresentar $C_p = 1,91$. O percentual da amostra fora da especificação é nulo, mostrando uma estimativa de que todo o processo encontra-se dentro dos limites toleráveis. De acordo com os resultados obtidos, a distribuição está levemente fora de centro ($C_{pk} = 1,60$) e a variação é menor que a faixa definida pelos limites de tolerância.

Para o *Req-1*, o principal agente contribuinte para a variação é o tubo, haja vista as características geométricas do Spool-1D, que é majoritariamente composto por um tubo. Dessa forma, entre os agentes contribuintes para variação total, o tamanho do tubo e a perpendicularidade das suas faces totalizam 73% de impacto, ao passo que a perpendicularidade da face do flange contribui em 21% para variação.

A Figura 27 apresenta o resultado obtido para simulação do *Req-2*, isto é, alinhamento da junção, que corresponde à excentricidade entre o tubo e o flange do Spool-1D.

Figura 27 – Alinhamento da junção (Spool-1D).



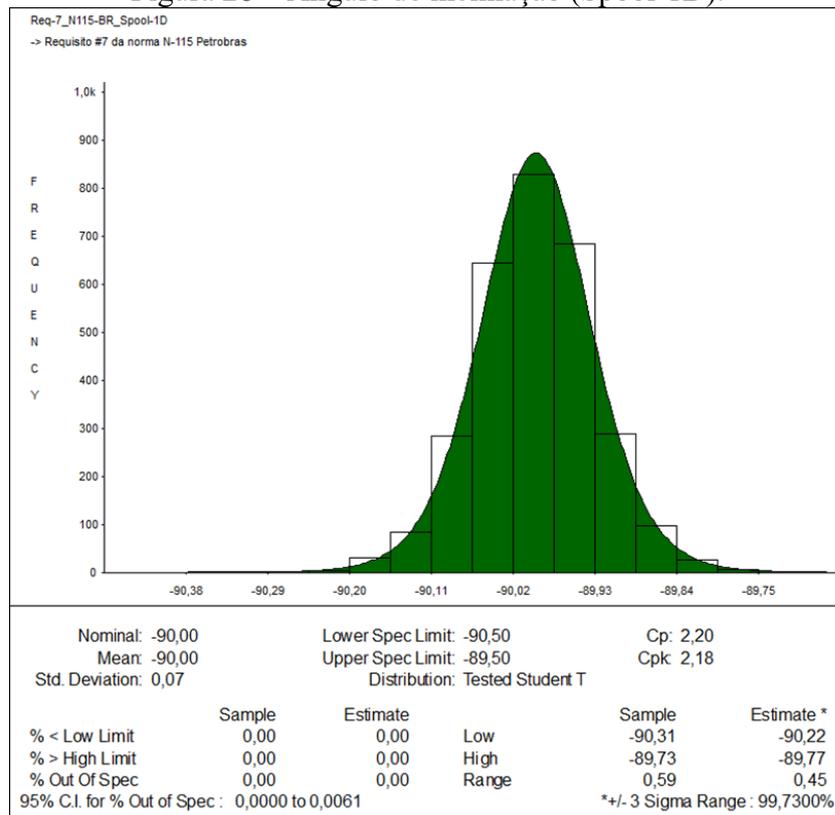
Fonte: elaborada pelo autor.

Da Figura 27 destaca-se que para o *Req-2* o processo apresenta $C_p = 0,71$. O percentual estimado da amostra fora da especificação é aproximadamente 3,2%, mostrando um índice de capacidade do processo inferior ao requisito mínimo anteriormente citado. De acordo com os resultados obtidos, a distribuição está centrada ($C_p = C_{pk}$), mas a variação é maior que a faixa dos limites de tolerância.

Para o *Req-2*, o principal contribuinte para a variação total é a posição do flange em relação ao tubo, evidenciando que, em juntas tipo topo, os erros de perpendicularidade das faces do tubo e do flange (lado soldado) não influenciam na qualidade do alinhamento. De outra maneira, a qualidade do processo de soldagem (junta tipo topo) pode prejudicar ou beneficiar o atendimento ao requisito. Além disso, em função do procedimento de medição – isto é, controle da qualidade geométrica, o requisito de alinhamento da junção é pouco influenciado pelo tamanho do tubo.

A Figura 28 apresenta o resultado obtido para simulação do *Req-7*, isto é, ângulo de inclinação do flange em relação à linha de centro da tubulação.

Figura 28 – Ângulo de inclinação (Spool-1D).



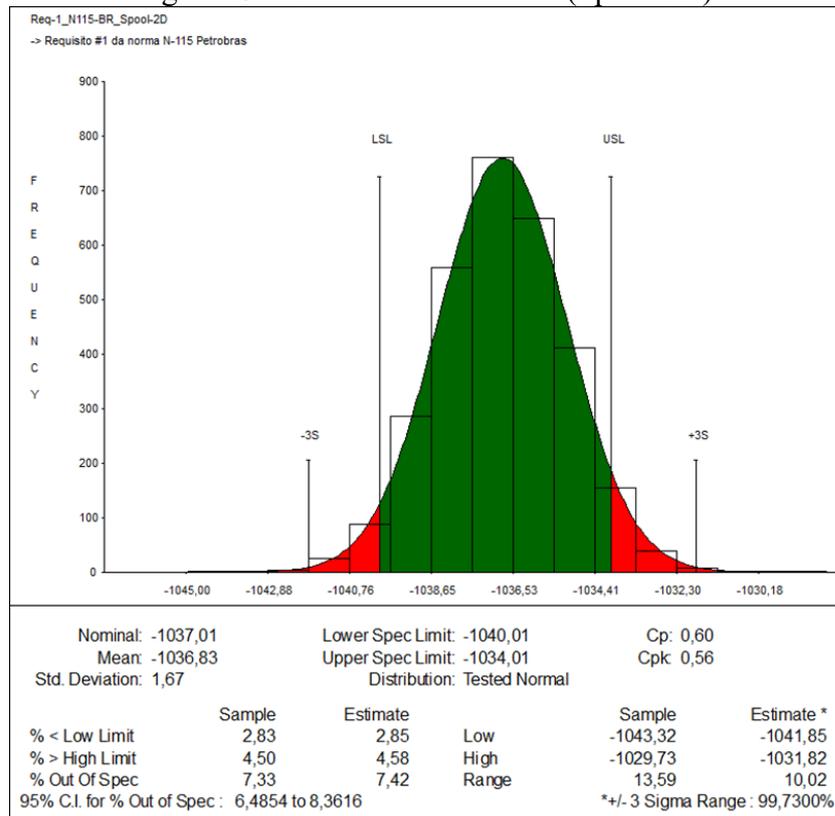
Fonte: elaborada pelo autor.

Da Figura 28 destaca-se que o processo é capaz, por apresentar $C_p = 2,20$. O percentual da amostra fora da especificação é nulo, mostrando uma estimativa de que o processo encontra-se dentro dos limites toleráveis. De acordo com os resultados obtidos, a distribuição está centrada ($C_{pk} = 2,18$) e há uma baixa variação em relação à faixa definida pelos limites de tolerância. Para o *Req-7*, o principal contribuinte para a variação total é a perpendicularidade da face do flange, mas a qualidade da junta é crucial para assegurar o cumprimento do requisito.

5.1.2 Spool-2D

Quando comparado ao Spool-1D, o Spool-2D apresenta maior número de componentes, incluindo uma curva, o que leva o fluxo a percorrer duas direções axiais. A Figura 29 apresenta o resultado obtido para simulação do *Req-1*, que trata da distância face a face entre as extremidades do tubo e do flange.

Figura 29 – Distância face a face (Spool-2D).

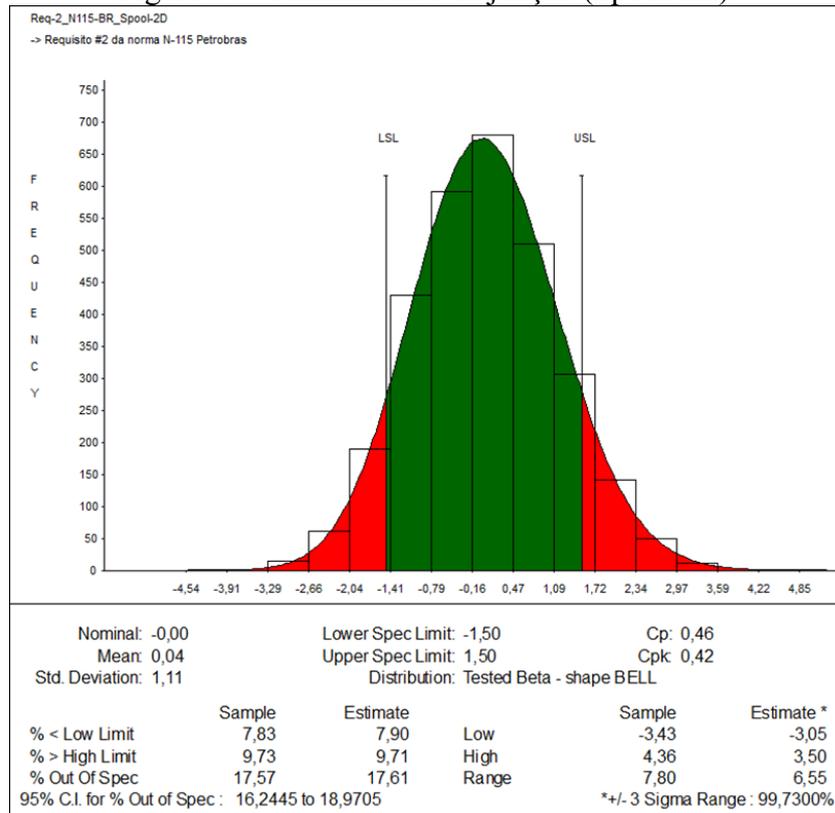


Fonte: elaborada pelo autor.

Da Figura 29 destaca-se que o processo apresenta $C_p = 0,60$ e o percentual estimado da amostra fora da especificação foi de aproximadamente 7,4%. Ao comparar com o resultado obtido para o Spool-1D, observa-se uma diminuição nos índices de capacidade, em função do aumento da complexidade do *spool*. Para o *Req-1* do Spool-2D, o principal contribuinte para a variação total é a orientação da curva, que causa 29% de impacto na variação total. De acordo com os resultados obtidos, a distribuição está centrada ($C_p = 0,56$), mas a variação é maior que a faixa definida pelos limites de tolerância.

A Figura 30 apresenta o resultado obtido para simulação do *Req-2*, isto é, alinhamento da junção, que corresponde à excentricidade entre o tubo e o flange do Spool-2D.

Figura 30 – Alinhamento da junção (Spool-2D).

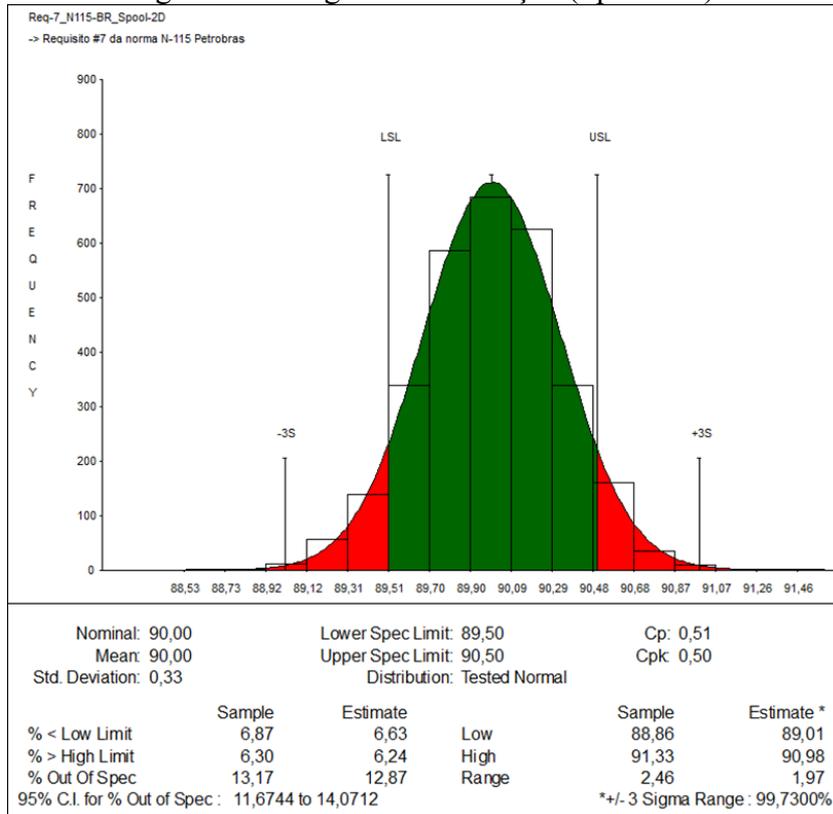


Fonte: elaborada pelo autor.

Assim como para o *Req-1*, a peça curva traz algumas consequências negativas para o *Req-2*. Da Figura 30, destaca-se que o processo apresenta $C_p = 0,46$ e a estimativa do percentual da amostra fora da especificação foi de aproximadamente 17,6%. Ao adicionar uma curva ao *spool*, o controle da sua orientação é fundamental para assegurar o atendimento ao requisito, ainda que o flange não seja soldado diretamente na curva. Para o *Req-2* do Spool-2D, o principal contribuinte para a variação total é a orientação da curva, que causa quase 30% de impacto na variação total. De acordo com os resultados obtidos, a distribuição está centrada ($C_p = 0,42$), mas a variação é maior que a faixa dos limites de tolerância.

A Figura 31 apresenta o resultado obtido para simulação do *Req-7*, que se refere ao ângulo de inclinação do flange em relação à linha de centro da tubulação.

Figura 31 – Ângulo de inclinação (Spool-2D).



Fonte: elabora pelo autor.

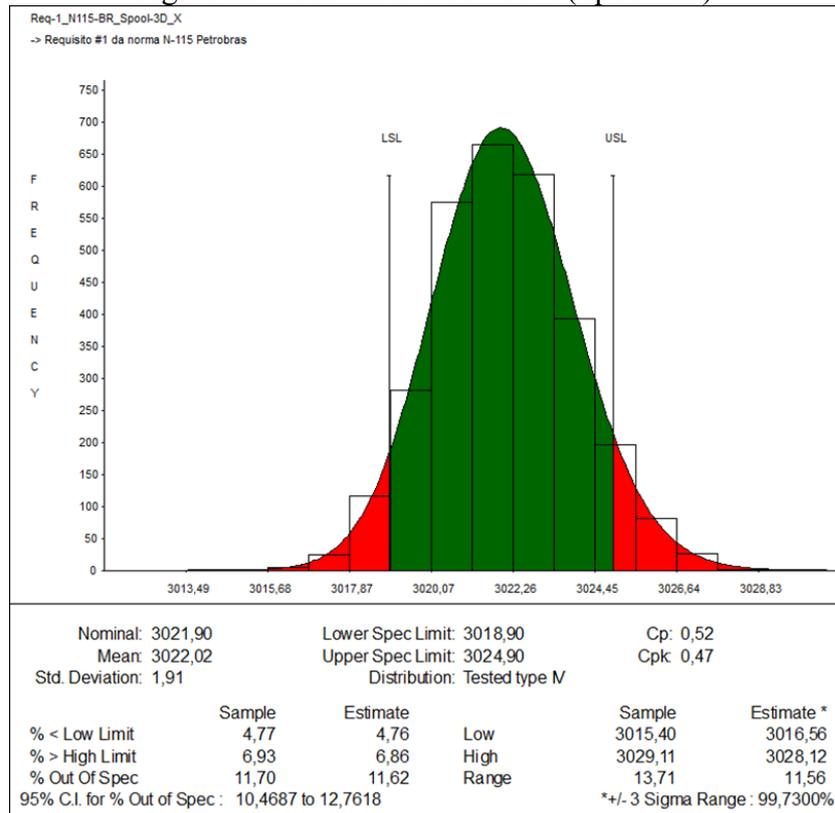
Da Figura 31 destaca-se que o processo apresenta $C_p = 0,51$ e o percentual estimado da amostra fora da especificação foi de aproximadamente 12,9%. No *Req-7*, a orientação da curva contribui em aproximadamente 45%, o que representa um agente significativo para variação total. De acordo com os resultados obtidos, a distribuição está centrada ($C_p \cong C_{pk}$), mas a variação é maior que a faixa definida pelos limites de tolerância.

5.1.3 Spool-3D

Entre os *spools* de teste adotados, o Spool-3D apresenta maior complexidade, por possuir maior número de componentes, incluindo duas curvas que condicionam fluxo em três direções axiais. Os efeitos atrelados à união de vários componentes pode comprometer o atendimento a alguns requisitos dimensionais e, dessa forma, afetar a qualidade geométrica do *spool* e da linha de tubulações.

A Figura 32 apresenta o resultado obtido para simulação do *Req-1*, que trata da distância face a face entre as extremidades dos flanges.

Figura 32 – Distância face a face (Spool-3D).



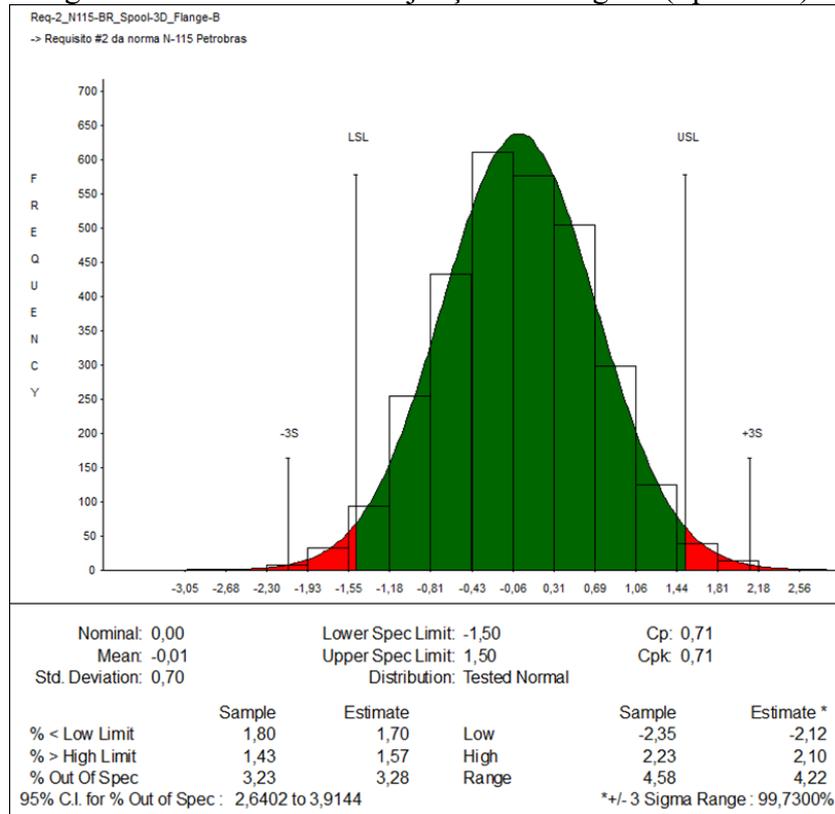
Fonte: elaborada pelo autor.

Da Figura 32 destaca-se que o processo apresenta $C_p = 0,52$. O percentual estimado da amostra fora dos limites da especificação foi de aproximadamente 11,6%. A orientação das curvas presentes no Spool-3D representa a maior parcela de contribuição, impactando em quase 45% da variação total. De acordo com os resultados obtidos, a distribuição está centrada ($C_p = 0,47$), mas a variação é maior que a faixa dos limites de tolerância.

Para o estudo da excentricidade entre o tubo e o flange, foi simulado e analisado o *Req-2* para o flange-A e para o flange-B, respectivamente, flanges a montante e a jusante.

A Figura 33 apresenta o resultado obtido para simulação do *Req-2* no flange-B, isto é, alinhamento da junção, que corresponde à excentricidade entre o tubo e o flange a jusante no Spool-3D.

Figura 33 – Alinhamento da junção do flange-B (Spool-3D).



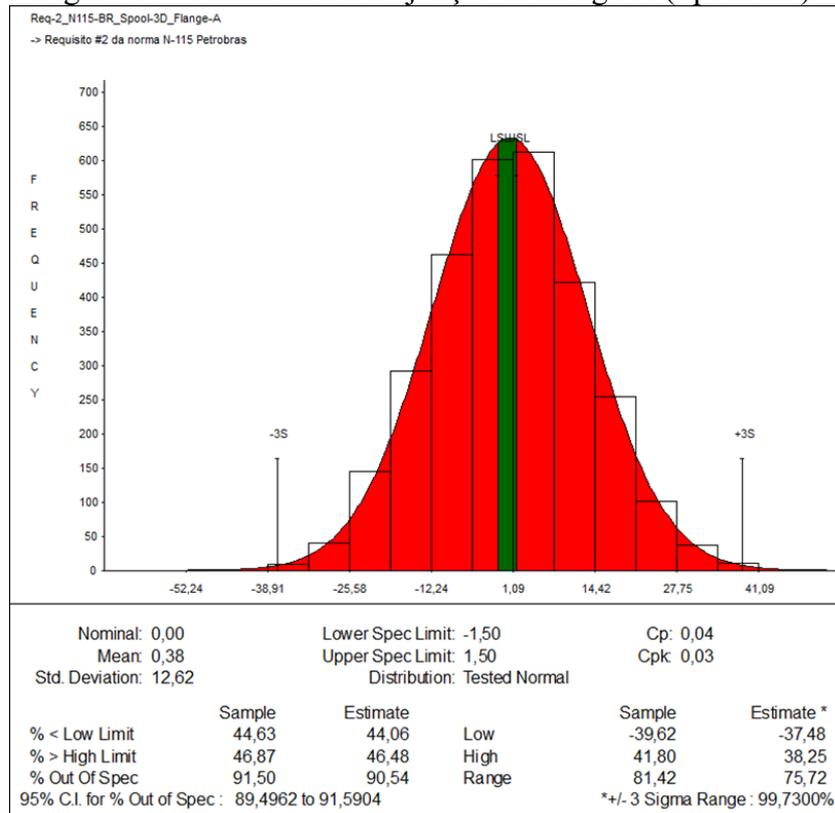
Fonte: elaborada pelo autor.

Durante o processo de fabricação do Spool-3D, que engloba o processo de união entre componentes do *spool*, o flange-B é o segundo componente que é soldado, para formar uma submontagem do Spool-3D. Ainda que o flange-B seja um dos primeiros componentes unidos à tubulação, a capacidade apresentada no processo é $C_p = 0,71$. De acordo com os resultados obtidos, a distribuição está centrada ($C_p = C_{pk}$), mas a variação é maior que a faixa dos limites de tolerância.

Cabe apontar que o resultado obtido para simulação do *Req-2* no flange-B é correlato com o resultado obtido para o mesmo requisito no Spool-1D (vide Figura 27). De fato, a operação de montagem que envolve o flange-B é semelhante a que envolve o flange que compõe o Spool-1D, na qual o componente flange é soldado, através de uma junta tipo topo, em um tubo longo, com comprimento superior a 6 m.

Durante a operação de montagem do Spool-3D, o flange-A é o último componente soldado à tubulação, tendo como consequência o acúmulo de variações que, quando combinadas, podem inviabilizar o cumprimento de um requisito funcional. A Figura 34 apresenta o resultado obtido para simulação do *Req-2* no flange-A, isto é, alinhamento da junção, que corresponde à excentricidade entre o tubo e o flange a montante no Spool-3D.

Figura 34 – Alinhamento da junção do flange-A (Spool-3D).



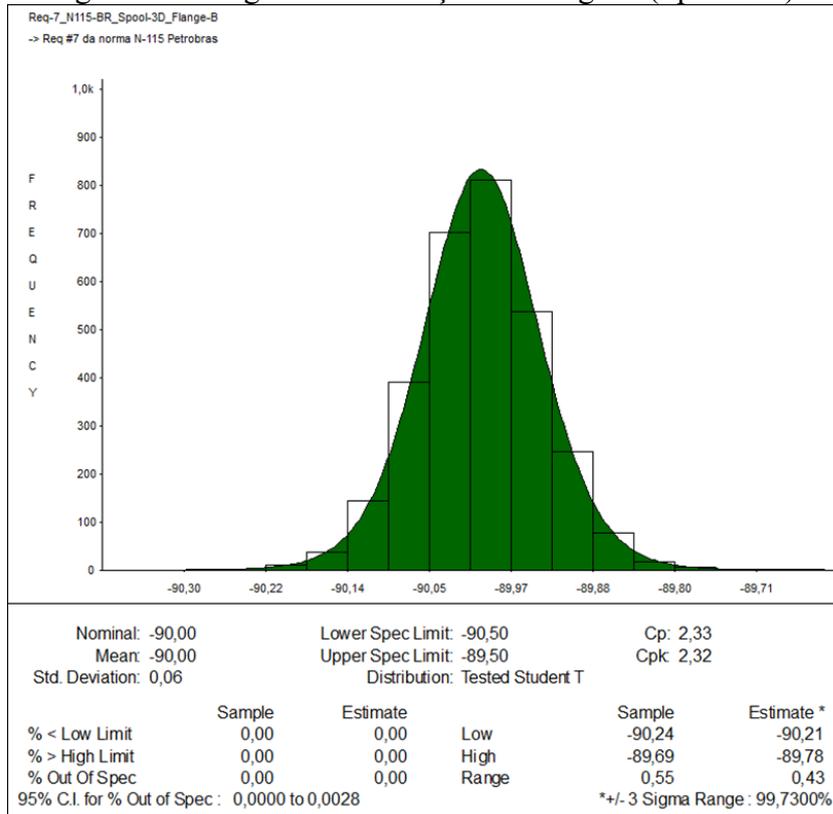
Fonte: elaborada pelo autor.

Da Figura 34 destaca-se que o processo apresenta C_p aproximadamente zero, pois a variação é muito maior que a faixa definida pelos limites de tolerância. De fato, o percentual estimado da amostra fora dos limites da especificação foi superior a 90%.

A orientação das curvas presentes do Spool-3D representa a maior parcela de contribuição para variação, impactando em quase 55% da variação total. A presença das duas curvas e o acúmulo dos potenciais desvios de fabricação de ambos componentes impactam de maneira significativa na qualidade geométrica do *spool*. Além disso, a sequência de montagem adotada, que inclui o flange-A como o último componente soldado ao Spool-3D, faz com que as variações se acumulem e resulte em consequências que inviabilizam o atendimento ao *Req-2*.

A Figura 35 apresenta o resultado obtido para simulação do *Req-7*, que se refere ao ângulo de inclinação do flange-B em relação à linha de centro da tubulação.

Figura 35 – Ângulo de inclinação do flange-B (Spool-3D).

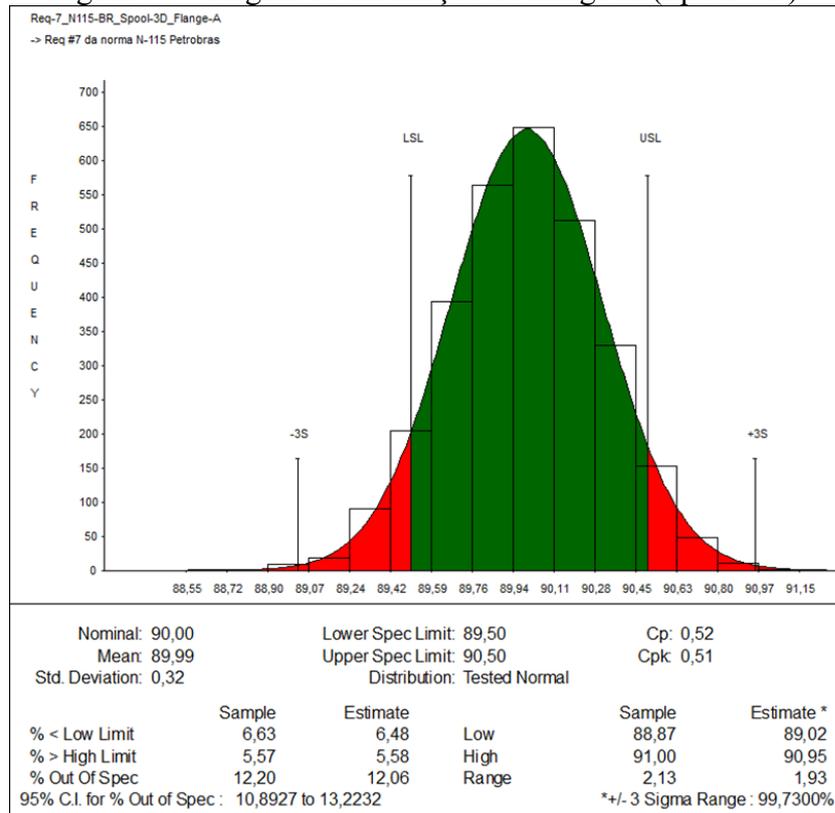


Fonte: elaborada pelo autor.

Da figura anterior destaca-se que o processo apresenta $C_p = 2,33$ e o percentual estimado da amostra fora da especificação é nulo, mostrando uma estimativa de que o processo encontra-se dentro dos limites toleráveis. Essa montagem é semelhante ao mesmo requisito para o Spool-1D e os resultados são compatíveis. A distribuição está centrada ($C_{pk} = 2,32$) e a variação é baixa em relação à faixa dos limites de tolerância. Para o *Req-7*, o principal contribuinte para a variação total é a perpendicularidade da face do flange, mas a qualidade da junta topo é crucial para assegurar o cumprimento desse requisito. Cabe ressaltar que no Spool-3D o flange-B é um dos primeiros componentes a ser soldado, apresentando, portanto, melhor índice de capacidade.

A Figura 36 apresenta o resultado obtido para simulação do *Req-7*, que se refere ao ângulo de inclinação do flange-A em relação à linha de centro da tubulação.

Figura 36 – Ângulo de inclinação do flange-A (Spool-3D).



Fonte: elaborada pelo autor.

Da Figura 36 destaca-se que o processo apresenta $C_p = 0,52$ e o percentual estimado da amostra fora da especificação foi de aproximadamente 12,0%. Para o *Req-7* (flange-A), o principal contribuinte para a variação são as curvas que afetam em aproximadamente 51% a variação total. De acordo com os resultados obtidos, a distribuição está centrada ($C_p \cong C_{pk}$), mas a variação é maior que a faixa dos limites de tolerância.

5.1.4 Discussões – caso *intra spools*

Os resultados obtidos com a simulação de variações para o caso *intra spool* demonstram, para além das informações quantitativas a respeito da capacidade do processo e dos principais agentes de contribuição para variação, que o cumprimento das tolerâncias dimensionais e geométricas contidas nas normas vigentes de projeto e fabricação não é o suficiente para assegurar o atendimento a alguns requisitos da norma PETROBRAS N-115:2016. Ainda, a sequência de montagem estabelecida pode dificultar ou inviabilizar a montagem de um componente, em função do acúmulo de variações na medida em que os

componentes do *spool* são unidos através do processo de soldagem caracterizado por juntas tipo topo.

As simulações no caso *intra spool* despertam maior interesse nos fabricantes de tubulações industriais, pois, no caso *intra*, os *spools* são tratados como um produto final. No entanto, é essencial que se estabeleça na fábrica a percepção sobre a importância do controle e compreensão das variações, a fim de garantir a qualidade geométrica do *spool* como unidade, na perspectiva de assegurar a integridade da linha de tubulações. A linha, de fato, é o conjunto de *spools* montados responsável pelo transporte de fluidos.

Com os resultados apresentados nesta seção, algumas reflexões e possibilidades se manifestam. Dentre elas, informações que contribuem para:

- *Formação e capacitação*: a tolerância assume um papel fundamental para o projeto e fabricação de tubulações industriais, pois estabelece uma representação da variação entre a dimensão máxima e a dimensão mínima que um componente do *spool* pode ter.

- *Revisão de documentos vigentes*: os dados de tolerância descritos nas normas e documentos de projeto e fabricação adotados nesta pesquisa não descrevem limites de especificação de acordo com a complexidade do *spool*. Ao analisar os resultados obtidos para os Spool-1D, Spool-2D e Spool-3D, para os mesmos requisitos, a capacidade do processo é diferente, levando a percentuais expressivos de estimativa da amostra fora dos limites da especificação.

- *Produtividade*: de posse de um gêmeo digital para garantia da qualidade geométrica, a unidade de fabricação (*pipe shop*) pode conhecer a capacidade do processo e, diante dos índices obtidos, propor alterações de projeto. Os *spools* são unidades customizadas, com possibilidades distintas de geometria e, portanto, é possível alterar, melhorar ou validar um projeto de *spool*, à luz da garantia da geometria. Dessa forma, a aprovação de um modelo para etapa de manufatura pode ser balizada pelo gêmeo digital, evitando alterações tardias, retrabalhos e desperdícios.

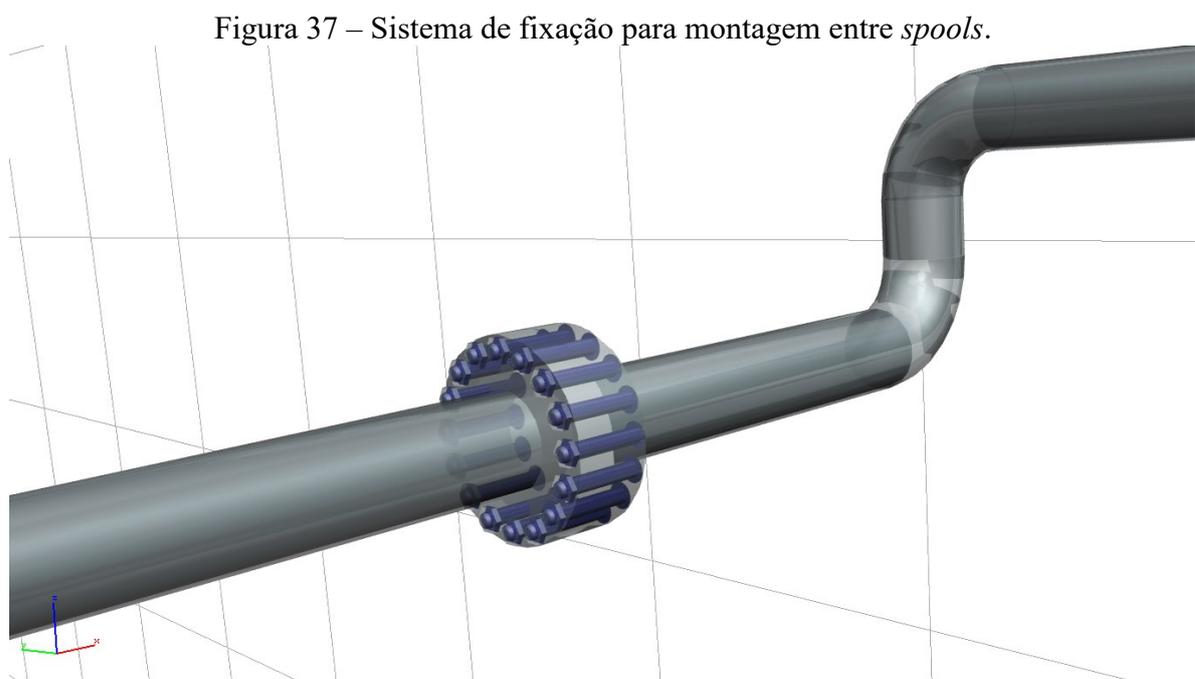
- *Criar estratégias de desempenho*: o *pipe shop* pode fazer uso das informações obtidas com o gêmeo digital para selecionar fornecedores ou adaptar a manufatura. Por exemplo, para o Spool-1D, que tem como requisito funcional a distância face a face, o tubo pode ser usinado internamente pelo *pipe shop*, mas o flange pode ser fabricado via fornecedor. A estação de fabricação (interna) pode ser alimentada com dados da variação do tamanho do flange recebido. Com isso, a máquina de corte do tubo pode ser ajustada e fazer

com que os parâmetros de projeto do tubo tenham como objetivo compensar a variação do flange. Dessa forma, a variação do flange e a tolerância de fabricação do tubo são movidas para o produto final – Spool-1D. O mesmo raciocínio vale para *spools* mais complexos, envolvendo tubos, curvas e flanges.

5.2 VARIAÇÕES ENTRE SPOOLS

Para a simulação de variações *entre spools*, foi adotada a sequência de montagem que é estabelecida no campo (*on-site*), onde, de acordo com a linha de tubulações selecionada, o Spool-3D é montado no Spool-1D e, depois, o Spool-2D é montado no Spool-3D. Sendo assim, as simulações foram executadas a fim de estudar o acúmulo de variações a partir dessa ordem de montagem. No estudo *entre spools*, cada *spool* é tratado como um componente que, quando unidos, formam a linha de tubulações de interesse. Dessa forma, é possível prever e observar se há algum problema de montagem, antes que o *spool* físico seja fabricado.

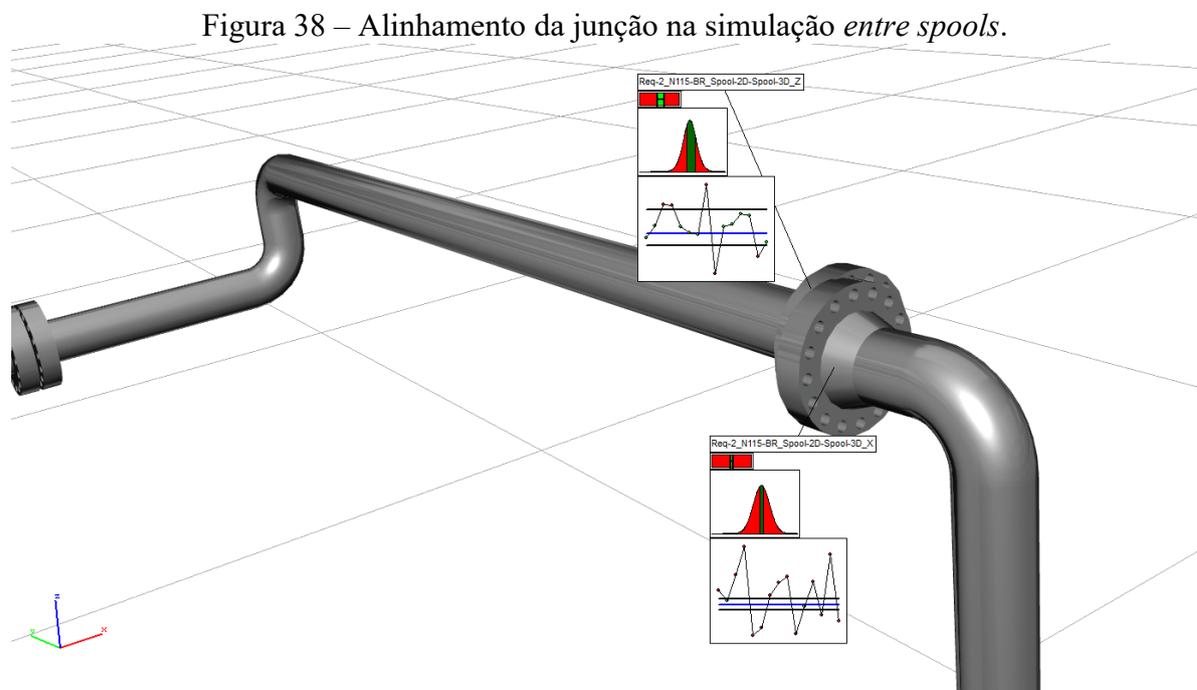
Durante a etapa de montagem virtual dos *spools*, o procedimento de montagem que envolve a fixação dos flanges com parafusos e porcas foi considerado, respeitando as práticas recomendadas de montagem. A Figura 37 destaca o sistema de fixação adotado entre os *spools*.



Fonte: elaborada pelo autor.

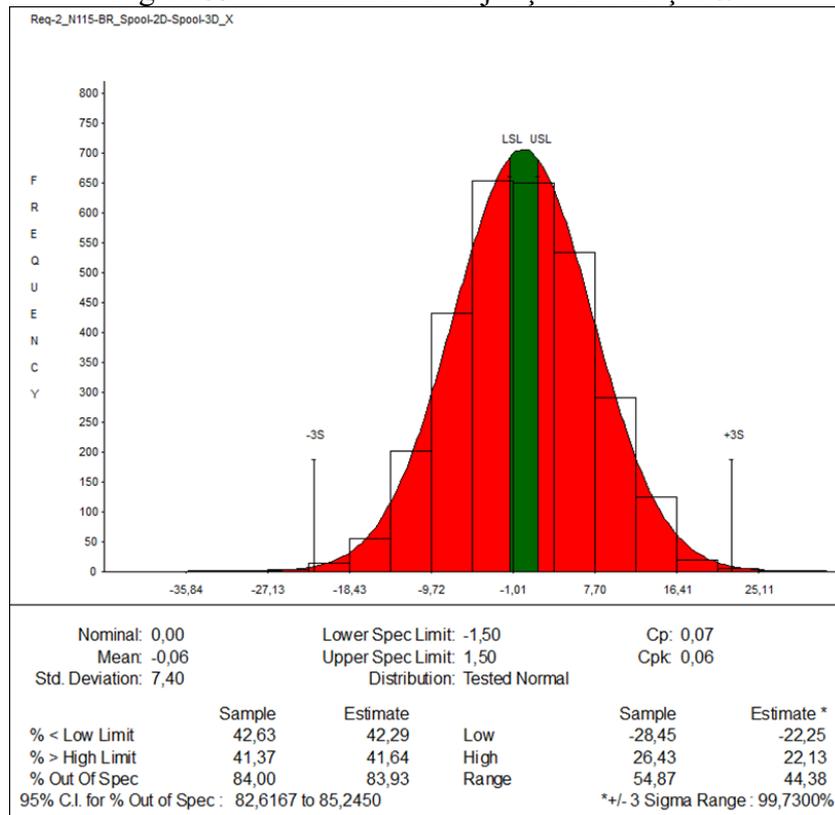
As análises foram feitas com o intuito de avaliar a montagem do último *spool* para compor a linha de tubulações – ou seja, uma análise que demonstra a capacidade de montagem entre o Spool-2D e o Spool-3D.

A primeira análise foi estabelecida com base no *Req-2* da norma PETROBRAS N-115:2016, que trata do alinhamento da junção e corresponde à excentricidade entre os flanges do Spool-2D e do Spool-3D. As simulações foram feitas em duas direções axiais, a fim de observar a capacidade do processo nas direções x e z . A Figura 38 ilustra os resultados obtidos para análise do *Req-2*, com destaque ao desalinhamento dos flanges. Os histogramas apresentados nessa figura serão analisados na sequência nas Figuras 39 e 40.



Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 39 apresenta o resultado obtido para simulação do *Req-2* na direção x .

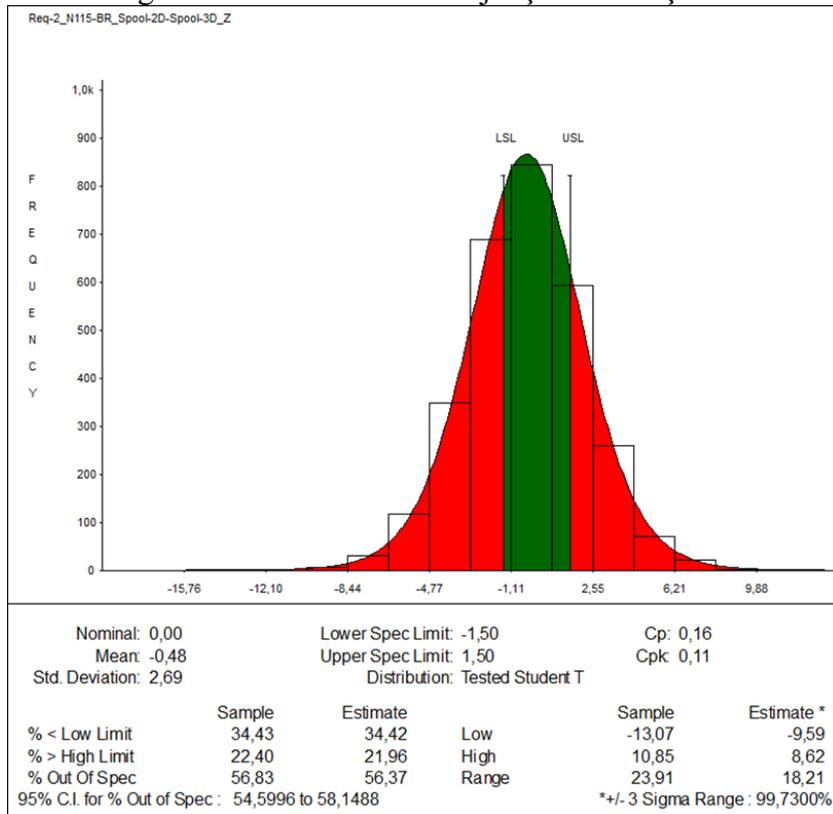
Figura 39 – Alinhamento da junção na direção x .

Fonte: elaborada pelo autor.

O *offset* radial entre os flanges do Spool-2D e do Spool-3D, em função do acúmulo de variações durante a montagem dos *spools*, pode inviabilizar a montagem da linha. De fato, durante a experimentação virtual, a excentricidade entre flanges desses *spools* assumiu valores estimados superiores a 22 mm (valor absoluto) na direção x . Com isso, o processo apresenta índices de capacidade C_p e C_{pk} aproximadamente zero e o percentual estimado da amostra fora da especificação é superior a 83%.

A Figura 40 apresenta o resultado obtido para simulação do *Req-2* na direção z .

Figura 40 – Alinhamento da junção na direção z.

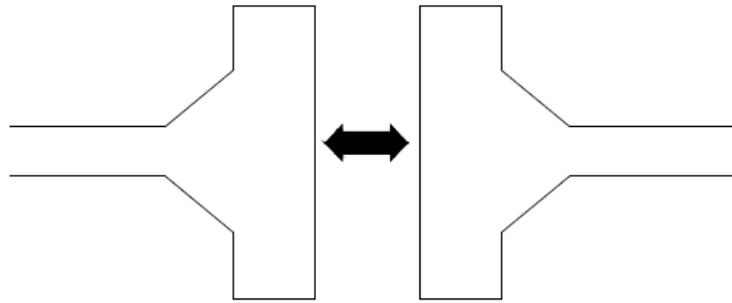


Fonte: elaborada pelo autor.

O *offset* radial na direção z apresenta resultados semelhantes à direção x. O processo apresenta índices de capacidade $C_p = 0,16$ e $C_{pk} = 0,11$. Além disso, o percentual estimado da amostra fora da especificação é superior a 56%. Na direção z, a excentricidade entre flanges do Spool-2D e do Spool-3D assumiu valores estimados superiores a 18 mm (valor absoluto).

Para estudar o espaço excessivo (ou folga), conforme ilustrado na Figura 41 e definido pela norma PETROBRAS N-115:2016, foi adotada a condição na qual o flange do Spool-2D e o flange do Spool-3D estão afastados, na direção y, por uma distância até duas vezes a espessura da junta tipo topo.

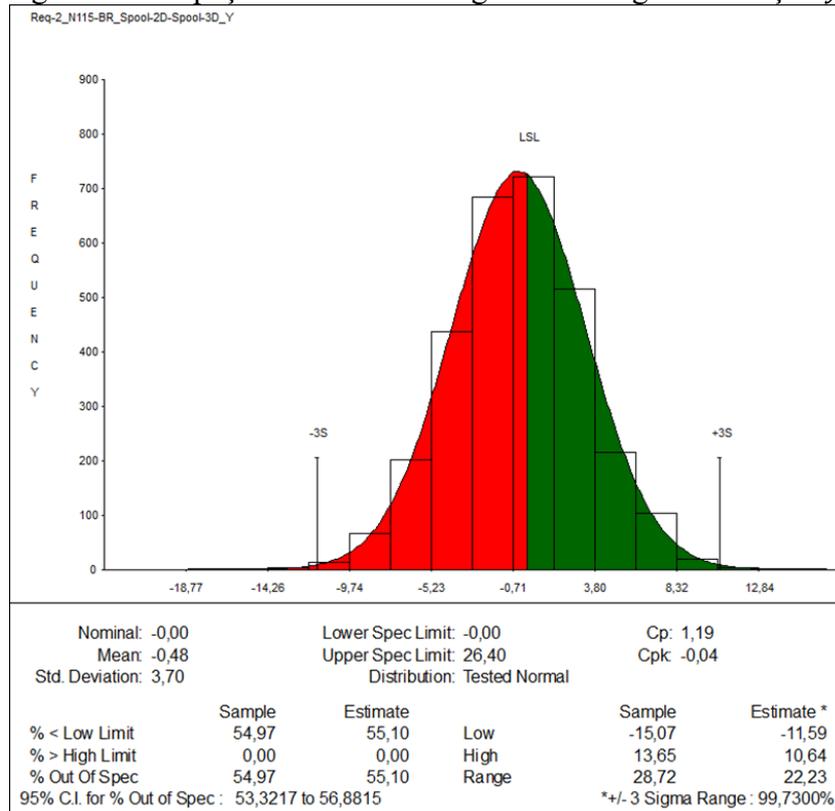
Figura 41 – Espaço excessivo ou folga entre flanges.



Fonte: (PETROBRAS, 2016).

A Figura 42 apresenta o resultado obtido para simulação do requisito correspondente à folga entre flanges na direção y , de acordo com o modelo desenvolvido de análise de variações.

Figura 42 – Espaço excessivo ou folga entre flanges na direção y .



Fonte: elaborada pelo autor.

Da Figura 42 destaca-se que para o requisito de folga entre flanges o processo apresenta índice de capacidade $C_p = 1,19$. O percentual estimado da amostra fora da

especificação é aproximadamente 55%, com um índice de capacidade C_{pk} menor que zero, em virtude de a média estar fora do intervalo de tolerância. Embora a tolerância estabelecida para o requisito de folga entre flanges seja alta, quando comparada à tolerância de alinhamento da junção nas direções x e z , o acúmulo de variações, que ocorre na medida em que as tubulações são conectadas entre si, pode comprometer a montagem de um *spool* para composição da linha.

5.2.1 Discussões – caso *entre spools*

As simulações de variações para caso *entre spools* apresentaram resultados que induzem apontamentos para além das evidências quantitativas a respeito da capacidade do processo. Assim como no caso *intra spool*, a sequência de montagem estabelecida pode dificultar ou inviabilizar a montagem. No caso *entre*, essa operação é realizada através de dispositivos de fixação, que devem ter a sua geometria, localização, sequência de aperto e integridade assegurados, para favorecer a montagem no campo.

As simulações no caso *entre spools* despertam maior interesse para as empresas responsáveis pela montagem no campo, haja vista que nesse caso a linha é tratada como um produto final.

Com os resultados apresentados nesta seção, é possível criar algumas reflexões e possibilidades para assegurar a qualidade geométrica da linha, de forma complementar a discussão apresentada na seção 5.1.4. Dentre elas, informações que contribuem para:

- *Gerenciar as variações*: o *spool*, como unidade, assume desvios de fabricação que, na medida em que outros *spools* são montados entre si, pode dificultar a montagem do último *spool*. Esse é perturbado pelo acúmulo de variações e pode ter a sua montagem prejudicada, seja no alinhamento, seja na folga exigida para efetuar a montagem das tubulações.

- *Definir a sequência de montagem*: a definição da sequência de montagem no campo pode ser estabelecida assumindo critérios de garantia da qualidade geométrica da linha de tubulações. Dessa forma, o procedimento de montagem dos *spools* pode ser validado ou alterado, diante dos resultados obtidos com o gêmeo digital, com o qual é possível prever problemas de montagem. Por exemplo, o requisito de alinhamento da junção que, quando não cumprido, impossibilita a montagem e, portanto, não permite o atendimento a um requisito funcional da linha.

- *Seleção do fornecedor*: a empresa responsável pela contratação do *pipe shop* pode adotar o gêmeo digital de garantia da geometria para assegurar que a fábrica é capaz de cumprir com os requisitos de montagem, adotando dados disponíveis da capacidade do processo para compor a entrada da simulação. A magnitude de um empreendimento de O&G, muitas das vezes, exige processos licitatórios que envolvem concorrentes distintos, que podem buscar diferenciais competitivos, a partir de conhecimentos via experimentação virtual.

6 CONCLUSÃO

*A palavra também é meu ofício.*²⁸

Do que fora visto até aqui, a variação geométrica nos processos de fabricação geralmente é propagada ou acumulada, resultando em produtos que podem não atender às condições funcionais ou de montagem. Sendo assim, a simulação dimensional pode ser usada para prever problemas de geometria de forma antecipada, evitando modificações tardias de projeto, retrabalhos, desperdícios ou favorecendo o desenvolvimento de conceitos mais robustos, melhorando a especificação da tolerância e a sequência de montagem.

Ao longo deste trabalho, foi possível constatar que:

- A indústria de tubulações faz uso de processos convencionais e a qualidade final dos produtos depende, muitas das vezes, das habilidades e do nível de capacitação pessoal, fazendo com que os *spools* apresentem desvios significativos da qualidade dimensional.

- A cadeia de tubulações industriais é complexa, composta por antíteses que envolvem pouca qualidade dimensional e a magnitude de um projeto de tubulações, que alcança uma variedade desmedida de conceitos de geometria dos *spools*. No entanto, a diversidade de juntas e operações de montagem não é tão vasta e, por isso, viabilizando a seleção e modelagem dos principais desvios de fabricação no nível dos componentes (tubos, curvas e flanges).

- O processo de desenvolvimento do produto (*spool*) pode ser beneficiado com o uso de tecnologias da Indústria 4.0, que propiciam um ambiente de manufatura conectado digitalmente, com potencial de fluxo de informações diversas, favorecendo uma melhor gestão do ciclo de vida do produto.

- A Indústria 4.0 possibilita tecnologias, métodos e ferramentas que podem ser adotadas para o processo de garantia da qualidade geométrica de tubulações industriais, propiciando um ambiente de engenharia com maior integração entre áreas, pessoas e recursos. Dessa forma, contribuindo com as etapas de pré-fabricação e, conseqüentemente, minimizando os custos associados a desvios da qualidade.

²⁸ Título do “1º Concurso Literário da Indústria”, no qual “*muitos textos surgem da coragem e ousadia dos trabalhadores*”.

- Em especial, adotar um gêmeo digital para garantia da qualidade geométrica dos *spools* é útil para estimar, minimizar, controlar e compreender as variações nos processos de fabricação e montagem.

Neste marco da pesquisa, foram apresentados elementos teóricos e experimentais que instigam possibilidades com um gêmeo digital para garantia da qualidade geométrica. De posse dessa entidade virtual, foi possível demonstrar que:

- Cada componente do *spool* apresenta variações que, se não controladas, podem comprometer um requisito funcional do produto ou, até mesmo, impossibilitar a montagem desse *spool* na linha de tubulações, o que implica a necessidade de ajustes no campo ou retrabalhos.

- Na medida em que a diversidade e a complexidade dos *spools* aumentam, torna-se mais difícil compreender as variações e, portanto, fazer uso de tecnologias fundamentadas no computador permite que experimentos virtuais sejam adotados, a fim de prever as quantidades e causas de variação.

- É possível estimar, sem a necessidade de criar protótipos físicos, a porcentagem de rejeição de montagem (virtual), as fontes de contribuição para variação, a função densidade de distribuição e os índices de capacidade do processo. Essas informações podem ser usadas para formar conhecimento ao longo do ciclo de vida do produto.

- O conjunto de informações e especificações contido em normas e documentos vigentes de projeto e fabricação de tubulações industriais não estão em consonância com as especificações descritas na norma PETROBRAS N-115:2016. Para os *spools* de teste adotados neste trabalho, as simulações resultaram, em alguns casos, numa variação maior que a faixa definida pelos limites de tolerância da norma supracitada.

- Um gêmeo digital pode ser útil para unidade de fabricação de *spools* (*pipe shop* ou estaleiro) e para a empresa responsável pela montagem *on-site*. Ainda que com finalidades distintas, em ambos os casos o protótipo digital é útil para prever problemas de montagem e evitar custos devidos aos desvios da qualidade geométrica.

- Um gêmeo digital pode fornecer informações a respeito dos principais agentes contribuintes para variação total. Essas informações são úteis para criar planos de medição com base nas características dimensionais significativas.

Com base no que fora apresentado, discutido e identificado a partir do gêmeo digital para garantia da qualidade geométrica, são propostas algumas práticas voltadas à cadeia de tubulações industriais. Essas atividades, que têm como intuito o controle e compreensão das variações dimensionais, resultam em mais valor para os processos. São elas:

- Capacitar pessoas na temática de garantia da qualidade geométrica, incorporando uma cultura organizacional que assimile a importância de controlar as variações nos processos de fabricação.

- Estabelecer um conjunto de atividades sistêmicas destinadas a prever, evitar e reduzir a ocorrência de variações dimensionais que causem problemas nos *spools* ou na linha. Para tanto: (1) planejar os requisitos nos níveis do *spool* e da linha; (2) analisar as tolerâncias; (3) assegurar a capacidade das máquinas e dispositivos de produção; (4) garantir a confiabilidade das medições.

- Fazer uso de um gêmeo digital para assegurar que os efeitos da variação comum do processo de manufatura não causem problemas no *spool*, haja vista que já estão previstos e considerados pela engenharia do produto na sua especificação geométrica.

- Fazer uso de um gêmeo digital para definir e validar tolerâncias dimensionais e geométricas, buscando uma relação de compromisso entre projeto, fabricação e montagem.

- Desenvolver um projeto de tubulações que considere as variações que cada componente do *spool* pode ter, para que, no conjunto, as folgas e espaçamentos não sejam excedidos. As tolerâncias que controlam essas variações devem ser definidas em consonância com a precisão dos processos e máquinas disponíveis.

- Fazer uso do arquivo CAD durante o projeto de tubulações industriais, a fim de possibilitar uma representação abrangente da geometria dos *spools*. Recomenda-se que esse arquivo contemple o conjunto de informações e especificações do produto e esteja inserido em uma plataforma de gestão do ciclo de vida, o que traz benefícios para a rastreabilidade, comunicação e fluxo de dados.

- Criar normas e procedimentos que apresentem as devidas condições para reproduzir a função do *spool* e para replicar condições realistas a respeito dos desvios dimensionais e geométricos.

É de fundamental importância a continuidade de trabalhos que contribuam com a disseminação das ferramentas de análise de variações e do uso avançado de gêmeos digitais

para garantia da qualidade geométrica nas distintas etapas ao longo do ciclo de vida do produto. Esta pesquisa também apontou para a escassez de trabalhos que se dedicam a temática de análise de variações e, portanto, como trabalhos futuros, recomenda-se:

- Replicar as análises executadas nesta pesquisa com outros *spools* de teste, incluindo diferentes diâmetros (NPS) e outros tipos de juntas. Assim, será possível observar o impacto das variações para diferentes casos e, com isso, tornar o protótipo digital ainda mais confiável e abrangente.

- Simular outros requisitos dimensionais descritos na norma PETROBRAS N-115:2016, incluindo o efeito do desvio de rotação do flange em uma direção, a fim de analisar o desalinhamento dos furos por rotação do flange em relação à posição nominal.

- Além do conjunto de informações a respeito da dimensão, orientação e localização, incluir no modelo de análise de variações os desvios de forma dos componentes do *spool*, a fim de observar o impacto desses desvios e compreender, de fato, sua real relevância em projeto de tubulações industriais.

- Ampliar esta pesquisa considerando o *spool* como um sólido flexível, incluindo uma abordagem envolvendo elementos finitos, a fim de acrescentar no modelo outros fatores que afetam a qualidade geométrica do *spool*. Por exemplo, o efeito da gravidade, forças e tensões envolvidas.

- Expandir as entradas adotadas nesta pesquisa. Além de dados de tolerância, incluir no modelo dados da capacidade do processo de fabricação, possibilitando que o gêmeo digital tenha outras funcionalidades e traga mais valor ao longo do ciclo de vida do produto.

Por fim, ficam as oportunidades e possibilidades com o uso do gêmeo digital para garantia da qualidade geométrica de tubulações industriais, cabendo, inclusive, reproduzir conceitos, métodos e ferramentas explorados nesta pesquisa para outras aplicações, em outros setores e seguimentos que busquem avaliar seus dados via experimentação virtual. Dessa forma, fazendo uso de meios da transformação digital para melhoria contínua da competitividade.

REFERÊNCIAS

ABRAMOVICI, M.; GÖBEL, J. C.; SAVARINO, P. Reconfiguration of smart products during their use phase based on virtual product twins. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, n. 66, 2017. 165-168.

ALBERTAZZI, A.; SOUZA, A. R. D. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. 2ª. ed. [S.l.]: Manole, 2018.

ARYA, S.; SACHIN, K.; CINEY, J. Application of Monte Carlo technique for analysis of tolerance and allocation of reciprocating compressor assembly. **International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology**, vol. 2, n. 1, 2012. 15-20.

BIGGS, J. M. **Introduction to Structural Dynamics**. New York: McGraw-Hill, 1964.

BOORLA, S. M. et al. Industry 4.0 - A challenge for variation simulation tools for mechanical assemblies. **Advances in Computational Design**, Daejeon, v. 4, n. 1, 2019. p. 43-52.

CAI, N.; QIAO, L.; ANWE, N. **Assembly Model Representation for Variation Analysis**. CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing. [S.l.]: [s.n.]. 2015. p. 241-246.

CAMARGO, R. **Estudo de otimização dimensional para controle de projeto robusto em sistema de análise de tolerância**. Universidade Metodista de Piracicaba. Santa Bárbara D'Oeste. 2010.

CERQUEIRA, R. C. **Gestão Dimensional no Desenvolvimento de Produtos: uma aplicação na indústria automotiva**. Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC. Salvador. 2011.

CHASE, K. W.; GREENWOOD, W. H. **Computer-Aided Tolerance Selection: CATS**. Brigham Young University. Provo. 1986. (86-2).

CHASE, K. W.; MAGLEBY, S. P.; GLANCY, C. G. **A comprehensive system for computer-aided tolerance analysis of 2-D and 3-D mechanical assemblies**. Proceedings of the 5th International Seminar on Computer-Aided Tolerancing. Toronto: [s.n.], 1997.

DANTAN, J. Y. et al. Information modeling for variation management during the product and manufacturing process design. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, 2, 2008. 107-118.

DEANE, P. **The First Industrial Revolution**. 2^a. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1979.

DEMING, W. **Statistical Adjustment of Data**. New York: [s.n.], 1944.

EIFLER, T.; BOORLA, S. M.; HOWARD, T. J. **Toward meaningful manufacturing variation data in design – feature based description of variation in manufacturing processes**. Procedia CIRP. Gotemburgo: Elsevier. 2016. p. 190-195.

ELBRO, M.; OLESEN, J.; HOWARD, T. J. **Robust Design Impact Metrics: Measuring the effect of implementing and using Robust Design**. International Symposium on Robust Design. København: [s.n.]. 2014. p. 1-9.

EVANS, D. Statistical Tolerancing: The State of the Art. **Journal of Quality Technology**, 6, n. 4, 1974. 188-195.

FESHINA, S. S.; KONOVALOVA, O. V.; SINYAVSKY, N. G. Industry 4.0 - Transition to New Economic Reality. In: POPKOVA, E. G.; RAGULINA, Y. V.; BOGOVIZ, A. V. **Industry 4.0: Industrial Revolution of the 21st Century**. [S.l.]: Springer, 2019. ISBN ISSN 2198-4182.

FRANKEL, A. Siemens PLM - The Real Value of the Digital Twin. **YouTube - Siemens Software**, 2015. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=gK5sHDfBMP4>>. Acesso em: 15 setembro 2020.

GANGAHAR, S. FPSO Topsides Design Optimization - Reducing CAPEX Through Lighter Topsides Modules. **FPSO World Congress / FPSO Network**, 2015. Disponível em: <<https://www.fpsonetwork.com/epci/videos/fpso-topsides-design-optimization-reducing-capex-t>>. Acesso em: 10 junho 2020.

GERMAIN, F.; DENIMAL, D.; GIORDANO, M. **A Method for Three Dimensional Tolerance Analysis and Synthesis Applied to Complex and Precise Assemblies**. International Federation for Information Processing (IFIP). [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 55-65. International Precision Assembly Seminar.

GLAESSGEN, E. H.; STARGEL, D. S. **The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles**. 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Honolulu: [s.n.]. 2016. p. 1-14.

GRIEVES, M.; VICKERS, J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: KAHLEN, F.-J.; FLUMERFELT, S.; ALVES, A. **Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems**. Switzerland: Springer, 2017. p. 85 - 113.

GUNAL, M. M. **Simulation for Industry 4.0 - Past, Present and Future**. Switzerland: Springer, 2019. ISBN ISSN 1860-5168.

GUNAL, M. M.; KARATAS, M. Industry 4.0, Digitisation in Manufacturing, and Simulation: A Review of the Literature. In: GUNAL, M. M. **Simulation for Industry 4.0**. Switzerland: Springer, 2019. p. 19-37.

JURAN, J. **Juran on Planning for Quality**. [S.l.]: Free Press, 1988.

KOTEM. KOTEM Evolve Suite, 2020. Disponível em: <<https://kotem.com/evolve-suite/>>. Acesso em: 23 novembro 2020.

KROGSTIE, L.; GAARDER, A.; ANDERSEN, B. **Variation Analysis in Collaborative Engineering; an Industrial Case Study of Rocket Motor Development**. Procedia CIRP - Design Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2014. p. 306-311.

LEANEY, P. G. Design for Dimensional Control. In: HUANG, G. Q. **Design for X**. [S.l.]: Springer Science and Business Media, 1996. p. 173-195.

LEE, J. et al. Recent Advances and Trends in Predictive Manufacturing Systems in Big Data Environment. **Manufacturing Letters**, 1, n. 1, 2013. 38-41.

MONOSTORI, L. et al. Cyber-physical systems in manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 65, n. 2, 2016. 621-641.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 6ª. ed. [S.l.]: LTC, 2013.

NASCIMENTO, D. L. D. M. **Interoperabilidade entre sistemas de automação de projetos em tubulações industriais utilizando Industry Foundation Classes (IFC)**. Universidade Federal Fluminense. Niterói. 2012.

NGUYEN, D. S.; VIGNAT, F.; BRISSAUD, D. **Product Performance Simulation with Geometric Deviations throughout Its Life Cycle**. DET 2009 Proceedings. Heidelberg: Springer-Verlag. 2010. p. 79-95.

PARKINSON, A. Robust Mechanical Design Using Engineering Models. **Journal of Vibration and Acoustics**, 177, n. B, 1995. 48-54.

PENG, L.-C.; PENG, T.-L. **Pipe Stress Engineering**. Texas: ASME Press, 2009.

PETROBRAS. **Fabricação e Montagem de Tubulações Metálicas**. PETRÓLEO BRASILEIRO S. A. [S.l.]. 2016. (N-115 REV. H).

PETROBRAS/ABEMI. **Aumento da produtividade das empresas de construção e montagem com vistas à melhoria da competitividade da indústria nacional.** PETROBRAS / ABEMI. [S.l.], p. 1-131. 2004. (Promimp RF ABAST-02).

PFEIFER, T.; TORRES, F. **Manual de gestión e ingeniería de la calidad.** [S.l.]: Mira Ed., 1999. ISBN 978-84-89859-43-2.

PRISCO, U.; GIORLEO, G. Overview of current CAT systems. **Integrated Computer-Aided Engineering**, vol. 9, 2002. 373-387.

ROGERS, D. L. **Transformação Digital: repensando o seu negócio para a era digital.** Tradução de Afonso Celso da Cunha Serra. São Paulo: Autêntica Business, 2019.

ROSEN, R. et al. About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. **ScienceDirect IFAC-PapersOnLine**, vol. 48, n. 3, 2015. 567-572.

ROY, R. et al. Continuous maintenance and the future - Foundations and technological challenges. **CIRP Annals**, 65, n. 2, 2016. 667-688.

SALOMONS, O. W.; HOUTEN, F. J. A. M. V.; KALS, H. J. J. Current status of CAT systems. In: ELMARAGHY, H. A. **Geometric Design Tolerancing: Theories, Standards and Applications.** London: Springer, 1998. p. 438-452. ISBN 978-1-4613-7656-9.

SCHLEICH, B. **Skin Model Shapes: A new Paradigm for the Tolerance Analysis and the Geometrical Variations Modelling in Mechanical Engineering.** Friedrich-Alexander-Universität. Erlangen - Nürnberg. 2017.

SCHLEICH, B. et al. **Geometrical Variations Management 4.0: towards next Generation Geometry Assurance.** Procedia CIRP. Milão: Elsevier. 2018. p. 3-10.

SCHLEICH, B.; WARTZACK. How to determine the influence of geometric deviation on elastic deformations and the structural performance? **Proceedings of the Institution of**

Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 227, n. 5, 2013. 754-764.

SCHWAB, K. **A Quarta Revolução Industrial**. Tradução de Daniel Moreira Miranda. 1. ed. São Paulo: Edipro, 2016.

SHEWHART, W. **Economic Control of Quality of Manufactured Product**. New York: Van Nostrad, 1931.

SLEATH, D.; LEANEY, P. **Control of Dimensional Variation and Integrated Product Development**. Colloquium of Control of Dimensional Variation. Birmingham: [s.n.]. 1997.

SÖDERBERG, R. The digital twin for geometrical variations management 4.0. **DigiTalk Pod**, 13 março 2019. Acesso em: 20 março 2019.

SÖDERBERG, R. et al. **Virtual Geometry Assurance Process and Toolbox**. Procedia CIRP. Gotemburgo: Elsevier. 2016. p. 3-12.

SÖDERBERG, R. et al. Toward a digital twin for real-time geometry assurance in individualized production. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 66, 2017. p. 137-140.

SRINIVASAN, R.; WOOD, K.; MCADAMS, D. Functional tolerancing: A design for manufacturing methodology. **Research in Engineering Design**, 8, n. 2, 1996. 99-115.

STEARNS, P. N. **The Industrial Revolution in World History**. 4^a. ed. [S.l.]: Westview Press, 2013.

SURI, K. et al. **Model-based Development of Modular Complex Systems for Accomplishing System Integration for Industry 4.0**. International Conference on Model-Driven Engineering and Software Development. Porto: SCITEPRESS. 2017. p. 487-495.

TAGUCHI, G. **Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes**. [S.l.]: Quality Resources, 1986.

TELLES, P. C. S. **Tubulações Industriais - Materiais, Projeto, Montagem**. 10^a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

THORNTON, A. **Variation Risk Management: Focusing Quality Improvements in Product Development and Production**. [S.l.]: Wiley, 2003. ISBN 978-0-471-44679-8.

TURNER, J.; GANGOITI, A. B. Tolerance Analysis Approaches in Commercial Software. **Concurrent Engineering**, vol. 1, n. 2, 1991. 11-23.

VOELCKER, H. The current state of affairs in dimensional tolerancing: 1997. **Integrated Manufacturing Systems**, vol. 9, n. 4, 1998. 205-217.

WÄRMEFJORD, K. et al. Joining in Nonrigid Variation Simulation. In: UDROIU, R. **Computer-aided Technologies - Applications in Engineering**. [S.l.]: IntechOpen, v. Chapter 3, 2016. ISBN 978-953-51-2788-8.

WÄRMEFJORD, K. et al. **Inspection Data to Support a Digital Twin for Geometry Assurance**. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. [S.l.]: [s.n.]. 2017.

WARTZACK, S. et al. Lifecycle-oriented Tolerance Simulation. **Konstruktion**, n. 6, 2011. 63-74.

WARTZACK, S. et al. **Toleranzmanagement im Kontext von Industrie 4.0**. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. [S.l.]: [s.n.]. 2017. p. 170-172.

WECKENMANN, A. 10th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, CAT 2007. **Measurement Science and Technology**, 19, n. 6, 2008.

WHEELER, D. J. **Understanding Variation - The key to managing chaos**. Knoxville: SPC Press, 1993.

YAN, H.; WU, X.; YANG, J. Application of monte carlo method in tolerance analysis. **Procedia CIRP 27 - 13th CIRP conference on Computer Aided Tolerancing**, Hangzhou, China, 2015. 281-285.

YANG, K.; EL-HAIK, B. **Projeto para Seis Sigma**: um roteiro para o desenvolvimento do produto. Tradução de J. G. Buchaim; Pedro R. Bueno Neto e Candido Faga. [S.l.]: Educator, 2008.

APÊNDICE A – Buscas em bases de dados de publicações

Para elaboração do estado do conhecimento, foi adotada uma abordagem a fim de obter uma visão mais ampliada das publicações que poderiam ser interessantes para a realização desta dissertação. O foco foi dado às buscas com “análise de variações” (VA), de modo a compreender as diferentes possibilidades de desenvolver pesquisa na área. Concomitantemente, foram realizadas buscas com “*variation analysis*”, em função da escassez de publicações em âmbito nacional e devido à especificidade do tema. Assim, os termos “análise de variação” e “*variation analysis*” foram utilizados como descritores fixos, ao passo que outros descritores eram utilizados para filtrar a pesquisa.

Quadro A1 – Estratégia de busca em bases de dados da BDTD E CAPES.

Estratégia de busca em português	Estratégia de busca em inglês
“análise de variações” AND “tubulações”	“variation analysis” AND “spool”
	“variation analysis” AND “pipeline”
“análise de variações” AND “simulação”	“variation analysis” AND “simulation”
“análise de variações” AND “montagem”	“variation analysis” AND “assembly”
“análise de variações” AND “VA”	“variation analysis” AND “VA”
“análise de variações” AND “VisVA”	“variation analysis” AND “VisVA”
“análise de variações” AND “VisVSA”	“variation analysis” AND “VisVSA”
“análise de variações” AND “indústria 4.0”	“variation analysis” AND “industry 4.0”
“análise de variações” AND “variações geométricas”	“variation analysis” AND “geometrical variations”
“análise de variações” AND “garantia da geometria”	“variation analysis” AND “geometry assurance”
“análise de variações” AND “gêmeo digital”	“variation analysis” AND “digital twin”
“análise de variações” AND “gerenciamento de tolerância”	“variation analysis” AND “tolerance management”

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela A1 – Total de trabalhos com “análise de variações” e “*variation analysis*” encontrados nas bases BDTD e CAPES.

Descritor fixo	Base	Tipo de busca	Período	Qtde	Tipo de busca	Período	Qtde
Análise de variações	BDTD	Geral	Sem recorte temporal	284	Por assunto	Sem recorte temporal	0
			Com recorte temporal (2009-2019)	206		Com recorte temporal (2009-2019)	0
	CAPES	Geral	Sem recorte temporal	10	Por assunto	Sem recorte temporal	0
			Com recorte temporal (2009-2019)	10		Com recorte temporal (2009-2019)	0
Variation analysis	BDTD	Geral	Sem recorte temporal	0	Por assunto	Sem recorte temporal	0
			Com recorte temporal (2009-2019)	0		Com recorte temporal (2009-2019)	0
	CAPES	Geral	Sem recorte temporal	12038	Por assunto	Sem recorte temporal	1006
			Com recorte temporal (2009-2019)	9198		Com recorte temporal (2009-2019)	754

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela A2 – Quantidade de publicações encontradas nas bases BDTD e CAPES utilizando combinações de descritores.

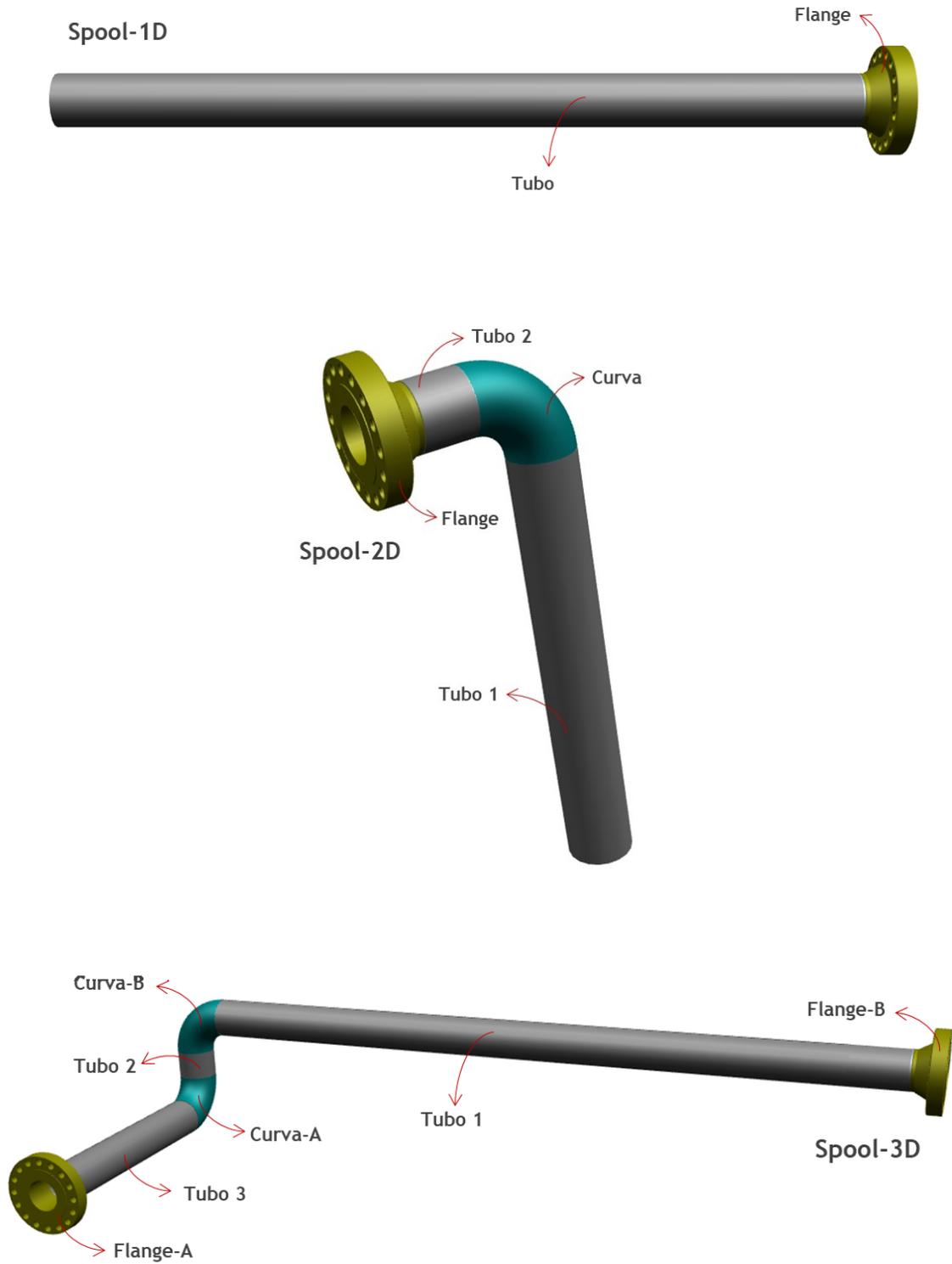
Descritores	BDTD	CAPES
“variation analysis” AND “simulation”	0	5
“variation analysis” AND “assembly”	0	6
“variation analysis” AND “VisVSA”	0	4
“variation analysis” AND “industry 4.0”	0	2
“variation analysis” AND “geometrical variations”	0	11
“variation analysis” AND “geometry assurance”	0	4
“variation analysis” AND “digital twin”	0	2
“variation analysis” AND “tolerance management”	0	1

Fonte: elaborada pelo autor.

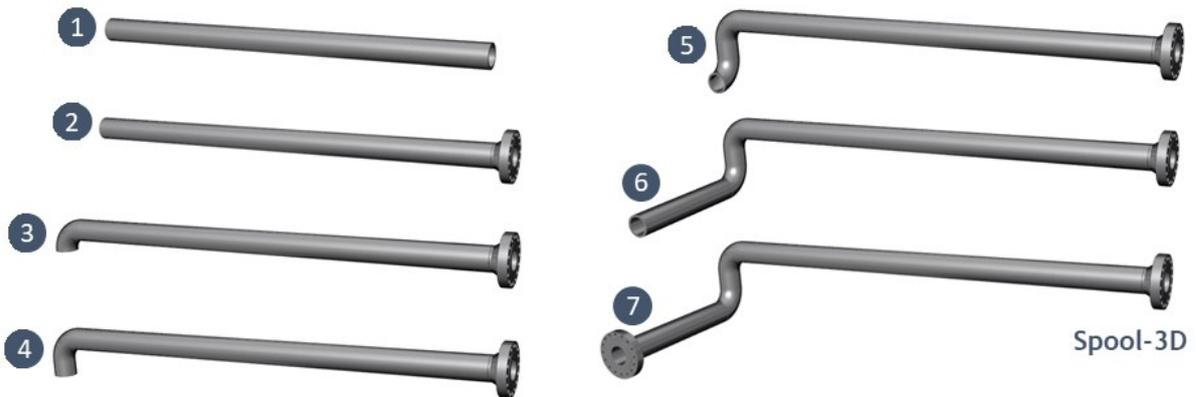
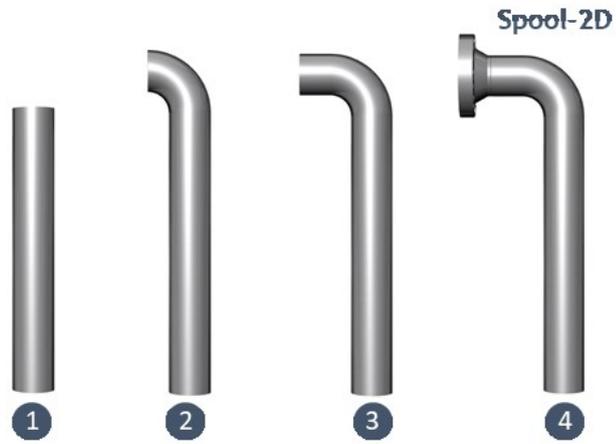
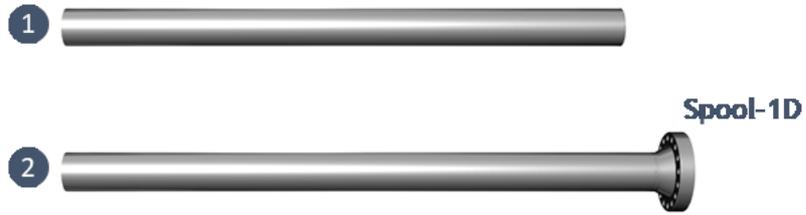
Tabela A3 – Total de publicações com a temática *variation analysis* nos eventos da CIRP CAT entre 2009 e 2019.

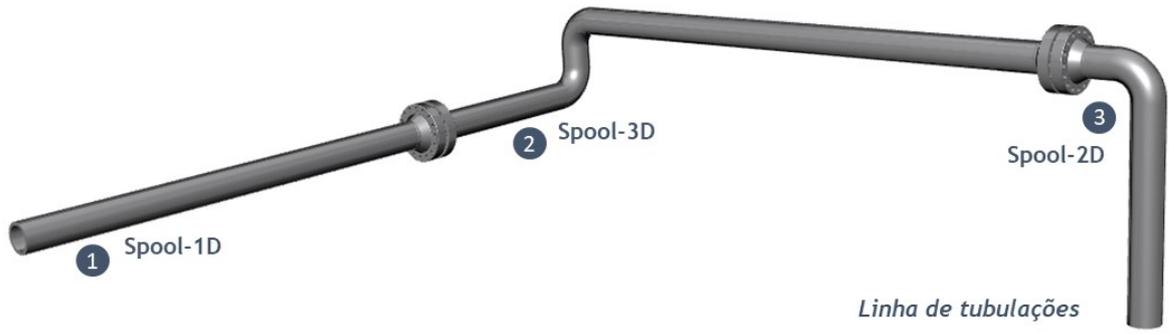
Edição	Ano	Local	Total de trabalhos
15th	2018	Milão, Itália	8
14th	2016	Gotemburgo, Suécia	16
13th	2014	Hancheu, China	5
12th	2012	Huddersfield, Reino Unido	3
11th	2009	Annecy, França	3

Fonte: elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – Spools de teste e seus componentes

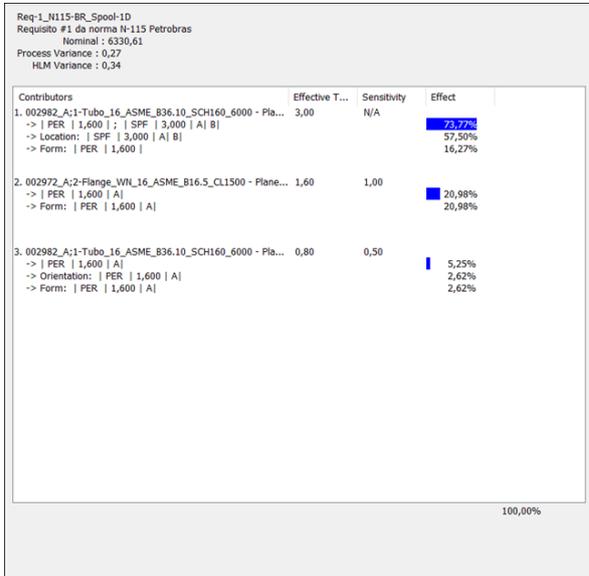
APÊNDICE C – Sequência de montagem dos *spools* de teste



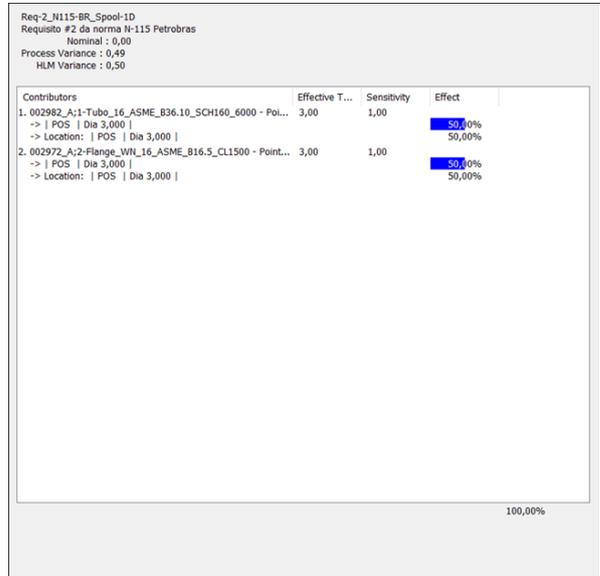


APÊNDICE D – Relatórios dos agentes de contribuição para variação

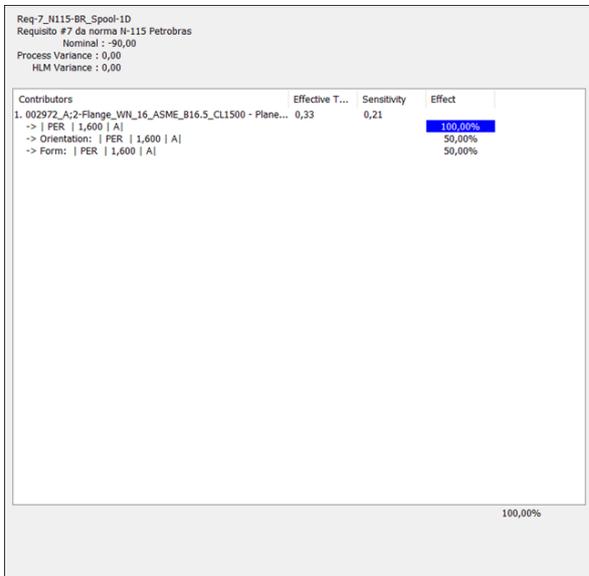
Req-1 – Spool-1D



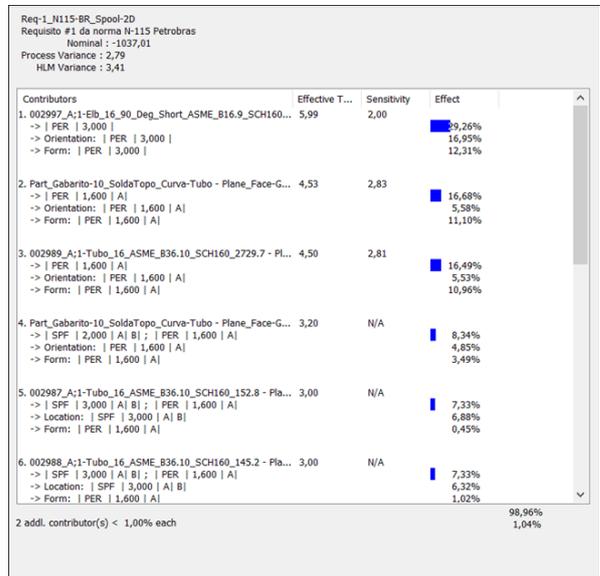
Req-2 – Spool-1D



Req-7 – Spool-1D



Req-1 – Spool-2D



Req-2 – Spool-2D

Req-2_N115-BR_Spool-2D
Requisito #2 da norma N-115 Petrobras
Nominal: -0,00
Process Variance: 1,23
HLM Variance: 1,40

Contributors	Effective T...	Sensitivity	Effect
1. 002997_A:1-Elb_16_90_Deg_Short_ASME_B16.9_SCH160... -> PER 3,000 -> Orientation: PER 3,000 -> Form: PER 3,000	3,13	1,04	19,45% 6,66% 12,79%
2. 002972_A:2-Flange_VN1_16_ASME_B16.5_CL1500 - Point... -> POS Dia 3,000 -> Location: POS Dia 3,000	3,00	1,00	17,88% 17,88%
3. 002987_A:1-Tubo_16_ASME_B36.10_SCH160_152.8 - Pol... -> POS Dia 3,000 -> Location: POS Dia 3,000	3,00	1,00	17,88% 17,88%
4. 002997_A:1-Elb_16_90_Deg_Short_ASME_B16.9_SCH160... -> PER 3,000 -> Orientation: PER 3,000 -> Form: PER 3,000	2,26	0,75	10,11% 5,93% 4,18%
5. 002988_A:1-Tubo_16_ASME_B36.10_SCH160_145.2 - Fla... -> PER 1,600 A -> Orientation: PER 1,600 A -> Form: PER 1,600 A	1,71	1,07	5,83% 1,95% 3,88%
6. Part_Gabarto-9_SoldaTopo_TuboMacarrao-Curva - Plane... -> PER 1,600 A -> Orientation: PER 1,600 A -> Form: PER 1,600 A	1,70	1,06	5,76% 1,95% 3,81%

100,00%

Req-7 – Spool-2D

Req-7_N115-BR_Spool-2D
Requisito #7 da norma N-115 Petrobras
Nominal: 90,00
Process Variance: 0,11
HLM Variance: 0,13

Contributors	Effective T...	Sensitivity	Effect
1. 002997_A:1-Elb_16_90_Deg_Short_ASME_B16.9_SCH160... -> PER 3,000 -> Orientation: PER 3,000 -> Form: PER 3,000	1,20	0,40	9,76% 9,92% 19,94%
2. 002997_A:1-Elb_16_90_Deg_Short_ASME_B16.9_SCH160... -> PER 3,000 -> Orientation: PER 3,000 -> Form: PER 3,000	0,85	0,28	14,89% 8,62% 6,27%
3. Part_Gabarto-9_SoldaTopo_TuboMacarrao-Curva - Plane... -> PER 1,600 A -> Orientation: PER 1,600 A -> Form: PER 1,600 A	0,64	0,40	8,47% 2,82% 5,65%
4. 002989_A:1-Tubo_16_ASME_B36.10_SCH160_2729.7 - Pl... -> PER 1,600 A -> Orientation: PER 1,600 A -> Form: PER 1,600 A	0,64	0,40	8,46% 2,82% 5,64%
5. 002988_A:1-Tubo_16_ASME_B36.10_SCH160_145.2 - Fla... -> PER 1,600 A -> Orientation: PER 1,600 A -> Form: PER 1,600 A	0,64	0,40	8,45% 2,82% 5,63%
6. Part_Gabarto-10_SoldaTopo_Curva-Tubo - Plane_Face-G... -> PER 1,600 A -> Orientation: PER 1,600 A -> Form: PER 1,600 A	0,64	0,40	8,44% 2,82% 5,62%

100,00%

Req-1 – Spool-3D direção x

Req-1_N115-BR_Spool-3D_X
Requisito #1 da norma N-115 Petrobras
Nominal: 3021,90
Process Variance: 3,65
HLM Variance: 4,25

Contributors	Effective T...	Sensitivity	Effect
1. 002997_A:1-Elb_16_90_Deg_Short_ASME_B16.9_SCH160... -> PER 3,000 -> Orientation: PER 3,000 -> Form: PER 3,000	5,99	2,00	23,48% 20,88% 2,61%
2. 002997_A:1-Elb_16_90_Deg_Short_ASME_B16.9_SCH160... -> PER 3,000 -> Orientation: PER 3,000 -> Form: PER 3,000	5,99	2,00	23,48% 20,07% 3,41%
3. 002984_A:1-Tubo_16_ASME_B36.10_SCH160_288.4 - Fla... -> PER 1,600 A -> Orientation: PER 1,600 A -> Form: PER 1,600 A	3,21	2,01	6,73% 5,75% 0,98%
4. Part_Gabarto-3_SoldaTopo_Curva-TuboMacarrao - Plane... -> PER 1,600 A -> Orientation: PER 1,600 A -> Form: PER 1,600 A	3,21	2,01	6,73% 5,75% 0,98%
5. Part_Gabarto-4_SoldaTopo_TuboMacarrao-Curva - Plane... -> PER 1,600 A -> Orientation: PER 1,600 A -> Form: PER 1,600 A	3,21	2,01	6,73% 5,75% 0,98%
6. 002984_A:1-Tubo_16_ASME_B36.10_SCH160_288.4 - Fla... -> SFF 3,000 A B PER 1,600 A -> Orientation: PER 1,600 A -> Form: PER 1,600 A	3,21	N/A	6,73% 5,38% 1,35%

2 addit. contributor(s) < 1,00% each
99,14%
0,86%

Req-2 – Spool-3D Flange-B

Req-2_N115-BR_Spool-3D_Flange-B
Requisito #2 da norma N-115 Petrobras
Nominal: 0,00
Process Variance: 0,49
HLM Variance: 0,50

Contributors	Effective T...	Sensitivity	Effect
1. 002985_A:1-Tubo_16_ASME_B36.10_SCH160_560.6 - Pol... -> POS Dia 3,000 -> Location: POS Dia 3,000	3,00	1,00	50,00% 50,00%
2. 002972_A:2-Flange_VN1_16_ASME_B16.5_CL1500 - Point... -> POS Dia 3,000 -> Location: POS Dia 3,000	3,00	1,00	50,00% 50,00%

100,00%

Req-2 – Spool-3D Flange-A

Req-2_N115-BR_Spool-3D_Flange-A
 Requisito #2 da norma N-115 Petrobras
 Nominal : 0,00
 Process Variance : 159,27
 HLM Variance : 175,95

Contributors	Effective T...	Sensitivity	Effect
1. 002997_A:1-Elb_16_90_Deg_Short_ASME_B16.9_SCH160...	33,70	11,23	17,93% 15,94% 1,99%
2. 002997_A:1-Elb_16_90_Deg_Short_ASME_B16.9_SCH160...	33,70	11,23	17,93% 15,31% 2,62%
3. 002997_A:1-Elb_16_90_Deg_Short_ASME_B16.9_SCH160...	33,70	11,23	17,93% 15,33% 2,60%
4. Part_Gabarito-2_SoldaTopo_Tubo-Curva - Plane_Face-Ga...	17,98	11,24	5,10% 4,36% 0,74%
5. Part_Gabarito-2_SoldaTopo_Tubo-Curva - Plane_Face-Ga...	17,98	N/A	5,10% 2,94% 2,16%
6. 002984_A:1-Tubo_16_ASME_B36.10_SCH160_288.4 - Fla...	17,98	N/A	5,10% 4,08% 1,02%

2 addl. contributor(s) < 1,00% each
 99,72%
 0,28%

Req-7 – Spool-3D Flange-B

Req-7_N115-BR_Spool-3D_Flange-B
 Req #7 da norma N-115 Petrobras
 Nominal : -90,00
 Process Variance : 0,00
 HLM Variance : 0,01

Contributors	Effective T...	Sensitivity	Effect
1. 002972_A:2-Flange_WN_16_ASME_B16.5_CL1500 - Plane...	0,47	0,29	100,00%

100,00%

Req-7 – Spool-3D Flange-A

Req-7_N115-BR_Spool-3D_Flange-A
 Req #7 da norma N-115 Petrobras
 Nominal : 90,00
 Process Variance : 0,10
 HLM Variance : 0,12

Contributors	Effective T...	Sensitivity	Effect
1. 002997_A:1-Elb_16_90_Deg_Short_ASME_B16.9_SCH160...	0,85	0,28	17,04% 15,15% 1,89%
2. 002997_A:1-Elb_16_90_Deg_Short_ASME_B16.9_SCH160...	0,85	0,28	17,04% 14,55% 2,49%
3. 002997_A:1-Elb_16_90_Deg_Short_ASME_B16.9_SCH160...	0,85	0,28	17,04% 14,57% 2,47%
4. 002972_A:2-Flange_WN_16_ASME_B16.5_CL1500_1 - Fla...	0,47	0,29	5,25% 1,75% 3,50%
5. 002984_A:1-Tubo_16_ASME_B36.10_SCH160_288.4 - Fla...	0,45	0,28	4,85% 4,14% 0,71%
6. 002984_A:1-Tubo_16_ASME_B36.10_SCH160_288.4 - Fla...	0,45	N/A	4,85% 3,88% 0,97%

100,00%

ANEXO A – Requisitos dimensionais da norma PETROBRAS N-115

