



COPPE/UFRJ

RANQUEAMENTO DE RISCO PARA DUTOS FLEXÍVEIS SUBMARINOS MEDIANTE
APLICAÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE DE ENVOLTÓRIA DE DADOS

Henrique Jaques Honorato

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

Orientadores: Theodoro Antoun Netto

Raad Yahya Qassim

RIO DE JANEIRO
OUTUBRO DE 2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

RANQUEAMENTO DE RISCO PARA DUTOS FLEXÍVEIS SUBMARINOS MEDIANTE
APLICAÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE DE ENVOLTÓRIA DE DADOS

Henrique Jaques Honorato

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

Examinada por:

Prof. Theodoro Antoun Netto, Ph.D.

Prof. Raad Yahya Qassim, Ph.D.

Prof. Murilo Augusto Vaz, Ph.D.

Prof. Luis Volnei Sudati Sagrilo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
OUTUBRO DE 2009

Honorato, Henrique Jaques

Ranqueamento de Risco para Dutos Flexíveis Submarinos Mediante Aplicação do Modelo de Análise de Envoltória de Dados / Henrique Jaques Honorato. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XIII, 137 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Theodoro Antoun Netto

Raad Yahya Qassim

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 104 -114.

1. Dutos Flexíveis. 2. Inspeção Baseada em Risco. 3. Análise de Envoltória de Dados (DEA). I. Netto, Theodoro Antoun *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

*“ A imaginação é mais importante que o conhecimento. Conhecimento auxilia por fora,
mas só o amor socorre por dentro. Conhecimento vem,
mas a sabedoria tarda.
Não basta ensinar ao homem uma especialidade, porque se tornará assim uma máquina
utilizável e não uma personalidade. É necessário que adquira um sentimento, um senso
prático daquilo que vale a pena ser empreendido, daquilo que é belo, do que é
moralmente correto.”*

Albert Einstein
(físico alemão 1879-1955)

Dedico esta dissertação a um dos principais alicerces de minha vida ...

*..... minha família querida que tanto amo.....mamãe Lourdes, meu irmão Humberto, minha
irmã Jupira Bárbara e a memória de meu pai Manoel Honorato.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado sabedoria, condições emocionais, perseverança e resistência estrutural para superar o cansaço físico e mental dos últimos meses.

Agradeço ao Prof. Theodoro Netto por ter compartilhado comigo o seu conhecimento, profissionalismo, competência, responsabilidade, amizade, otimismo, senso de humor,.....Obrigado por ter acreditado no meu trabalho

Existem pessoas que aparecem em nossas vidas para potencializar o nosso crescimento de forma honesta e respeitosa. Obrigado Theodoro.

Agradeço a atenção profissional do Prof. Raad Qassim, o qual me ensinou que o ser humano deve reunir vontade de aprender, entusiasmo, auto confiança, auto estima e auto crítica , necessárias para a formação de uma personalidade sólida de vida.

Obrigado minha família querida..... mamãe Lourdes, Humberto e Jupira Bárbara
Pelo apoio dado nas horas difíceis. Um homem só é completo se tiver o apoio de sua família na hora de tomar decisões.

Obrigado minha querida (amada) namorada Dani pela força, pelo carinho, amor, atenção, compreensão e apoio emocional dedicados a minha pessoa ao longo dessa jornada de estudo.

Obrigado aos Profs. Lídia Angulo Meza (UFF) e João Soares de Mello (UFF) pelo apoio amigo e profissional dedicados a minha pessoa.

Agradeço aos senhores professores Murilo Vaz e Volney Sagrilo por terem sido meus professores, pelo profissionalismo apresentado, por aceitarem participar de minha banca examinadora, mas acima de tudo, por serem pessoas humildes e honradas.

Agradeço por fim, o profissionalismo e a amizade prestados de forma espontânea pelos engenheiros Marcelo Igor (LTS/COPPE/UFRJ) e Victor Nogueira . A contribuição dos senhores foi muito significativa.

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

RANQUEAMENTO DE RISCO PARA DUTOS FLEXÍVEIS SUBMARINOS MEDIANTE
APLICAÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE DE ENVOLTÓRIA DE DADOS

Henrique Jaques Honorato

Outubro /2009

Orientadores: Theodoro Antoun Netto

Raad Yahya Qassim

Programa: Engenharia Oceânica

A segurança operacional de dutos flexíveis submarinos é fundamental para garantir a produção de óleo e gás. O planejamento de Inspeções Baseada em Risco (IBR) para dutos flexíveis offshore tem como objetivos permitir a operação de risers e flowlines dentro dos limites de segurança e garantir a avaliação de suas integridades estruturais minimizando o risco de falha. A IBR otimiza o plano e o intervalo de inspeção, gerando benefício econômico devido à redução de custos com inspeções desnecessárias.

O sucesso do planejamento IBR para dutos flexíveis submarinos depende da identificação dos principais danos estruturais, mecanismos de degradação, modos de falha, e o cálculo do risco de perda de produção desse tipo de estrutura. O objetivo deste trabalho é calcular o risco relativo do potencial de falha de dutos flexíveis através do modelo matemático da Análise Envoltória de Dados (DEA) mediante a descoberta dos principais mecanismos de falhas observáveis de dutos flexíveis offshore. A DEA utiliza a otimização de programação linear para construir uma fronteira empírica, ou “superfície envoltória” de máximo risco, identificando os dutos mais críticos sobre a envoltória e dutos menos críticos no interior da fronteira. O modelo calcula os fatores de risco através de programação linear, permitindo determinar de forma semi-quantitativa um ranqueamento de risco dos dutos em operação a partir de dados de inspeções periódicas.

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

LAUNDERING RISK FOR FLEXIBLE SUBMARINE PIPELINES BY APPLYING THE
MODEL DATA ENVELOPMENT ANALYSIS

Henrique Jaques Honorato

October/2009

Advisors: Theodoro Antoun Netto
Raad Yahya Qassim

Department: Ocean Engineering

The operational safety of flexible subsea pipelines is essential to ensure the production of oil and gas. Planning for Risk Based Inspection (RBI) for offshore flexible pipeline aims to allow the operation of risers and flowlines within the safety limits and ensure the assessment of its structural integrity while minimizing the risk of failure. RBI optimizes the plan and inspection interval, generating economic benefit due to reduced costs of unnecessary inspections.

The success of the IBR plan for flexible submarine pipeline depends on the identification of major structural damage, degradation mechanisms, failure modes, and calculate the risk of loss of production of this type of structure. The objective of this work is to calculate the relative risk of potential failure of products through flexible mathematical model of Data Envelopment Analysis (DEA) by the discovery of the major failure mechanisms observed flexible pipelines offshore. The DEA uses linear programming optimization to build an empirical frontier, or "surface envelope" of maximum risk, identifying the most critical products on the envelope and ducts less critical within the border. The model calculates the risk factors through linear programming, to determine in a semi-quantitative risk ranking of one of the pipelines in operation from the data of periodic inspections.

INDICE

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 - Objetivos	2
1.2 – Motivação	3
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica	5
2.1- Composição Estrutural de um Duto Flexível	5
2.2 – Falhas/Danos em Dutos Flexíveis Submarinos	6
2.3 – Técnicas de Inspeção/ Monitoramento de Dutos Flexíveis Submarinos	11
2.4 – Inspeção Baseada em Risco (IBR)	13
Capítulo 3 - Análise por Envoltória de Dados (DEA - Data Envelopment Analysis)	16
3.1 - Origem Histórica	16
3.2 – Objetivos - Modelo DEA	17
3.3 – Vantagens DEA	17
3.4- Limitações Importantes dos Modelos DEA	18
3.5 – Modelo Matemático DEA CCR Clássico	20
3.6 - Modelo DEA Avançado com Restrição ao Peso	27
3.7- Aplicações Interdisciplinares	28
Capítulo 4 – Metodologia de Inspeção Baseada em Risco (IBR) para Linhas Flexíveis Submarinas	29
Capítulo 5 – Mecanismos de Falha, Modos de Falha e Não-Conformidades de Dutos Flexíveis	34
5.1 – Não Conformidades de Inspeção Observáveis e Não-Observáveis em Dutos Flexíveis (Dados de Inspeção)	34
5.2 – Dados Operacionais de Potencialização - (DO_{pot})	37
5.3 – Modos de Falha em Dutos Flexíveis - (MF_S)	41

5.4 – Mecanismos de Falha Potenciais de Dutos Flexíveis Submarinos - (MCF_s)	44
Capítulo 6 - Modelo DEA de Maximização de Risco Relativo para Dutos Flexíveis Submarinos	48
6.1 – Objetivos	48
6.2 – Metodologia do Programa Computacional DEA Risco para Dutos Flexíveis	49
6.3 – Modelo Matemático DEA para Avaliação de Risco em Dutos Flexíveis Submarinos	51
6.4 – Descrição do Estudo de Caso e Origem dos Dados	59
Capítulo 7 – Ranqueamento de Risco Relativo para Dutos Flexíveis Submarinos	72
7.1 - Ranqueamento DEA/SIAD e Envoltória Bidimensional de Alto Risco – Riser	74
7.2 - Ranqueamentos de Risco do Especialista - (Φ_E)	86
7.3- Estudo Comparativo entre Ranqueamentos DEA/SIAD e Especialista (Φ_E)	87
7.4 - Modelo DEA Avançado com Restrições aos Pesos	93
7.5 - Análise dos Resultados	99
Capítulo 8 - Conclusões Finais	101
Referências Bibliográficas	104
ANEXO 1 - Mecanismo de Falhas Potenciais de Duto Flexível Submarino para aplicação Riser	115
ANEXO 2 - Mecanismo de Falhas Potenciais de Duto Flexível Submarino para aplicação Flowline	127
ANEXO 3 - Pesquisa Operacional - PROGRAMAÇÃO LINEAR	132
ANEXO 4 - Algoritmo Simplex	135

LISTA DE IDENTIFICAÇÃO DAS FIGURAS

Figura 1: Seção de um riser flexível.

Figura 2: Incidência de danos/falhas em dutos flexíveis submarinos.

Figura 3: Fluxograma de falha aplicada a tubos flexíveis.

Figura 4: Dano (rasgo ou corte) da capa externa gerada pela entrada do Bend Stiffener no I-tube.

Figura 5: Ruptura generalizada da capa externa.

Figura 6: Ruptura localizada de arames da armadura de tração devido a abrasão da capa externa.

Figura 7: Torção excessiva do riser na seção de topo devido a ruptura de arames da armadura de tração.

Figura 8: Corrosão de arames da armadura de tração e desgaste da capa externa.

Figura 9: Ruptura generalizada de arames da armadura de tração e corrosão avançada de arames.

Figura 10: Ruptura generalizada de arames da armadura de tração na seção de topo.

Figura 11: Instabilidade estrutural (“Gaiola de Passarinho”).

Figura 12: Reparo da capa externa de riser flexível por aplicação de fita adesiva.

Figura 13 - Matriz de Risco.

Figura 14: Fronteira de eficiência CCR/O para duas unidades U1 e U2 sob análise.

Figura 15: Interpretação gráfica do modelo de maximização CCR orientado a outputs.

Figura 16: Envoltória de eficiência do modelo CCR orientado a inputs.

Figura 17: Fluxograma de Metodologia de Inspeção Baseada em Risco de Dutos Flexíveis.

Figura 18: Árvore de Modos de Falhas Potenciais de Dutos Flexíveis Submarinos.

Figura 19: Critério de construção dos mecanismos de falhas de dutos flexíveis.

Figura 20: Fluxograma de Metodologia do Modelo DEA Risco para Ranqueamento de Dutos Flexíveis Submarinos.

Figura 21: Envoltória bidimensional DEA de alto risco para dutos flexíveis submarinos.

Figura 22: Critério de determinação dos pesos subjetivos via mecanismo de falha.

Figura 23: Fronteira de alto risco de dutos flexíveis (risers) : MF 2 \times MF 4

Figura 24: Fronteira de alto risco de dutos flexíveis (risers) : MF3 \times MF7

Figura 25: Fronteira de alto risco com excessivo poder discriminatório entre risers (modelo - β_3 / Rodada - R5).

Figura 26: Fronteira de alto risco com bom poder discriminatório entre flowlines (Modelo Θ_3 / Rodada R9).

LISTA DE IDENTIFICAÇÃO DE TABELAS

Tabela 1: Não-conformidades de Inspeção Detectáveis em Dutos Flexíveis Submarinos.

Tabela 2: Não-conformidades de Inspeção Detectáveis em Dutos Flexíveis Submarinos (Continuação).

Tabela 3: NCNO consideradas NCI para dutos flexíveis (Eventos Internos)

Tabela 4: NCNO considerada NCI para Barreira de Vedação.

Tabela 5: Dados Operacionais de Potencialização.

Tabelas 6: Correspondências entre os Dados de Operação Potencializadores e Não-conformidades Precipitadas.

Tabelas 7: Correspondências entre os Dados de Operação Potencializadores e Não-conformidades Precipitadas (continuação) .

Tabelas 8: Correspondências entre os Dados de Operação Potencializadores e Não-conformidades Não Observáveis Precipitadas.

Tabelas 9: Correspondências entre os Dados de Operação Potencializadores e Não-conformidades Precipitadas da barreira de vedação.

Tabela 10: Modos de Falhas Potenciais em Dutos Flexíveis Submarinos.

Tabela 11: Matriz DEA do especialista (pesos subjetivos NCI ou DO).

Tabela 12: Aplicação do método DEA – Matriz do especialista de pesos subjetivos.

Tabela 13: Pesos Subjetivos das Não-conformidades de Inspeção (NCI) do Modelo DEA Risco.

Tabela 14: Pesos Subjetivos dos Dados Operacionais – Output do Modelo DEA Risco.

Tabela 15: Tabela de seleção de variáveis DEA (Riser Flexível) – Primeira parte

Tabela 16: Tabela de seleção de variáveis DEA (Riser Flexível) – Segunda parte

Tabela 17: Tabela de não conformidades de inspeção e parâmetros operacionais para modelagem em DEA (Flowline Flexível).

Tabela 18: Matriz de Pesos (Especialista e DEA) e Ranking DEA/SIAD – Rodada (R1).

Tabela 19: Matriz de Pesos (Especialista e DEA) e Ranking DEA/SIAD – Rodada (R2).

Tabela 20: Matriz de Pesos (Especialista e DEA) e Ranking de Risco DEA/SIAD – Limitação (baixo poder discriminatório) - Rodada (R3).

Tabela 21: Matriz de Pesos (Especialista e DEA) e Ranking DEA/SIAD – Rodada (R4) – Verificação de limitações.

Tabela 22: Matriz de Pesos Subjetivos do Especialista e Ranking DEA/SIAD – Verificação de Limitação - Rodadas (R5, R6, R7 e R8).

Tabela 23: Ranking DEA/SIAD e Fatores de Risco (alta e baixa discriminação – Rodadas R5, R6, R7 e R8).

Tabela 24: Fatores de Risco e ranking DEA/SIAD – Rodadas R9 e R10 (Flowline).

Tabela 25: Estudo comparativo – Especialista (Φ_E) x DEA/SIAD (Θ_1 R1).

Tabela 26 : Estudo comparativo – Especialista (Φ_E) x DEA/SIAD (Θ_2 R2).

Tabela 27 : Estudo comparativo – Especialista (Φ_E) x DEA/SIAD (β_2 R4).

Tabela 28 : Estudo comparativo – Especialista (Φ_E) x DEA/SIAD (β_5 R7).

Tabela 29 : Restrição aos pesos dos MF_s – modelo δ_1 / rodada R11.

Tabela 30 : Ranqueamento DEA/SIAD (Clássico e Avançado - δ_1 R11) e Especialista $\Phi_E^{(1)}$.

Tabela 31 : Matriz de Pesos (Especialista e DEA) e Ranking DEA/SIAD (Avançado δ_2 / rodada R12).

Tabela 32 : Ranqueamento DEA/SIAD (Clássico e Avançado - δ_2 R12) e Especialista $\Phi_E^{(1)}$.

Capítulo 1 – Introdução

O comportamento estrutural de dutos flexíveis utilizados no setor de petróleo *offshore* apresenta um grau de incerteza no que se refere aos seus processos de deterioração. Durante a sua vida útil, essas estruturas podem ser submetidas a cargas acima dos níveis previstos do projeto. Outro fator de incerteza é a taxa de deterioração dos materiais que compõe a estrutura quando expostos ao meio ambiente e fluídos de produção.

Com o aumento da exploração de petróleo em águas ultraprofundas, condições ambientais desfavoráveis e a presença de agentes químicos agressivos nos fluídos de produção aumentam a incidência de não-conformidades que podem detonar diferentes mecanismos de degradação em dutos flexíveis. Diante desse contexto, inspeções periódicas devem ser realizadas para determinar as não-conformidades observáveis e mecanismos de falha correspondentes. O objetivo é a verificação dos potenciais danos gerados na estrutura do duto flexível, em seus equipamentos auxiliares e unidades flutuantes aos quais são conectados.

A preocupação em evitar a perda de vidas humanas e prejuízos financeiros, com inspeções e manutenções desnecessárias, exige um planejamento de inspeção ao longo da vida útil dos dutos flexíveis. Neste planejamento, o risco de falha estrutural deve ser considerado explicitamente, evitando o uso de técnicas tradicionais que envolvam a probabilidade e consequência de falhas.

Um dos objetivos desse trabalho é fornecer subsídios para Inspeção Baseada em Risco (IBR) para dutos flexíveis submarinos, procurando responder com bom senso uma das questões principais da IBR : Quais pontos estruturais devem ser priorizados durante a inspeção? Para tal, desenvolveu-se um programa computacional de Análise por Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis – DEA*) a fim de calcular o risco relativo potencial de falha e obter o ranqueamento dos dutos flexíveis mais críticos. Esta pesquisa contribui para o programa de IBR de dutos flexíveis, uma vez que identifica as principais não-conformidades de inspeção, modos de falhas e mecanismos de degradação nas camadas dessas estruturas.

A extensão e a generalização do modelo DEA para inspeção de dutos flexíveis em operação está sendo proposta nesta dissertação. A elaboração desta pesquisa foi possível devido a informações obtidas a partir de dados reais de inspeção e operação na

Bacia de Campos (RJ). Os dados de inspeção ou não-conformidades observáveis durante inspeção são organizados em uma sequência de eventos que podem eventualmente levar à falha da estrutura (mecanismos de falha).

Nos métodos de inspeções convencionais, dutos de alto (ou baixo) risco podem não estar recebendo a atenção e priorização adequada. Significa que dutos flexíveis de baixo risco podem estar sendo excessivamente inspecionados, enquanto que dutos de alto risco podem estar sendo negligenciados pelas equipes de inspeção. Essa falta de planejamento eficiente acarreta um prejuízo financeiro com inspeções desnecessárias. A técnica de inspeção abordada neste trabalho mostra explicitamente o risco e uma análise de integridade estrutural de dutos flexíveis de maneira satisfatória.

1.1 – Objetivos

A maior parte da produção nacional de petróleo é obtida a partir de poços situados em águas profundas e ultraprofundas, devendo-se utilizar plantas de processo com base em sistemas flutuantes de produção. O sucesso desta concepção se deve principalmente à utilização de dutos flexíveis capazes de acompanhar seus grandes deslocamentos.

O objetivo desse trabalho é o desenvolvimento de um modelo semi-quantitativo para auxiliar a otimização da periodicidade de inspeção baseada em risco para dutos flexíveis submarinos. A metodologia de avaliação do risco foi motivada pelo sucesso de aplicação do método de Análise de Envoltória de Dados em diversos setores.

Originalmente esta dissertação pretende contribuir de forma significativa e inovadora ao setor de petróleo e gás oferecendo os seguintes resultados da pesquisa:

- i. Identificar as principais não-conformidades observáveis durante inspeção de dutos flexíveis, e seus mecanismos de falhas correspondentes. Identificando quais elementos estruturais devem ser priorizados no planejamento de inspeção baseada em risco (IBR) desse tipo de duto.
- ii. Calcular o risco relativo de falha de dutos flexíveis através do método de Análise Envoltória de Dados (DEA) com utilização das não-conformidades e mecanismos de falhas encontradas;

- iii. Obter o ranqueamento e priorização de risco em dutos flexíveis submarinos para planejamentos de IBR.
- iv. Auxiliar equipes de inspeção que procuram a redução de risco ao nível mínimo viável, visando evitar incidentes que possam causar: perda de vida humana ou lesão, poluição ambiental e danos ao equipamento gerados em serviço ou durante a instalação.
- v. Proposta de substituição do conceito de Número de Prioridade de Risco (*risk priority number* - RPN) para o cálculo do risco de falha em estruturas industriais. A DEA oferece uma base matemática mais consistente e evita as limitações do RPN.

O modelo matemático que será proposto envolve os dados de inspeção detectáveis durante o serviço da linha flexível. Esses dados permitiram a identificação dos principais modos de falhas e mecanismos correspondentes que levam a perda total de produção do duto. A avaliação numérica do risco será realizada a partir de modelo computacional inspirado na DEA, cujo suporte matemático pode ser investigado nos trabalhos de BRADBURY (2002), MEZA *et al.*, (1998, 2005b), LINS (2000b), CORREIA (2008), MACEDO (2003), KANESIRO (2008), dentre outros.

O programa computacional DEA, baseado em programação linear, foi desenvolvido e adaptado para a determinação numérica do risco relativo de dutos flexíveis em operação offshore. O programa apresenta mecanismos de falhas significativamente mais complexos do que os de dutos rígidos. O sucesso da aplicação do modelo DEA será investigado em um estudo de caso a partir da inspeção dos danos observáveis de maior relevância e incidência durante a operação do duto.

1.2 – Motivação

Alguns motivos que levaram a realização deste trabalho:

- (i) Carência total de trabalhos na literatura acadêmica sobre mecanismos de falha de dutos flexíveis submarinos, onde não há relatos do desenvolvimento dos mesmos em ordem correta da ocorrência dos danos;

- (ii) Proposta simplificada de programas de inspeção baseada em risco para dutos flexíveis tendo como trabalhos motivadores SORENSEN *et al.* (2006), TIEN *et al.* (2007), LOBIANCO *et al.* (2003) e PEZZI (2003).
- (iii) Sucesso da aplicação interdisciplinar do método DEA comprovado em setores: hospitalar brasileiro (GONÇALVES *et al.*, 2007), agrícola (GOMES, 2004, MELLO, 2003b), companhias aéreas brasileiras (MELLO *et al.*, 2003c), e refinarias de petróleo (LINS *et al.*, 2006b).
- (iv) Facilidade na aplicação e implementação de modelos matemáticos DEA, investigados em BRADBURY (2002), MEZA *et al.*, (2005b), MACEDO (2003), OLIVEIRA (2008), KANESIRO (2008), CASA NOVA *et al.* (2007). Essas bibliografias especializadas serviram de suporte matemático para a extensão do uso da DEA para dutos flexíveis.
- (v) Propostas futuras para a substituição do método de probabilidade de falha para a DEA, visando o cálculo do risco potencial em outras estruturas navais (navios FPSOs, Dutos Rígidos, Cabos umbilicais, etc).
- (vi) Permitir apoio à decisão da escolha do tipo e época da próxima inspeção, baseados nos resultados do ranqueamento de dutos pelo modelo DEA.
- (vii) Ferramenta de auxílio na garantia da integridade estrutural de dutos flexíveis, buscando reduzir o índice de avarias e possíveis riscos de acidentes ambientais.

Vale ressaltar que grande parte dos programas de gerenciamento de integridade faz o cálculo do risco por probabilidade de falha e consequência de ocorrência de falha. Esta estratégia utiliza os conceitos de criticidade determinada pelo cálculo do Número de Prioridade de Risco (*risk priority number* - RPN) matriz de risco e Análise dos Modos, Efeitos e Criticidade de Falhas (*failure mode, effects and criticality analysis* - FMECA).

Neste caso, o ranqueamento de criticidade dos componentes é obtido pela ordem descendente de valores de RPN calculados. No setor de petróleo e gás não há trabalhos que priorizem o cálculo do risco relativo de sistemas de dutos flexíveis mediante a aplicação da Análise por Envoltória de Dados. Correspondendo um dos motivos que justifica a composição desta dissertação.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

2.1 – Composição Estrutural de um Duto Flexível

Os dutos flexíveis são estruturas constituídas de camadas poliméricas e camadas metálicas dispostas em helicóides, cada uma com características geométricas e físicas específicas. As camadas poliméricas têm função de vedação, ou seja, mantêm o fluido em seu interior, e podem auxiliar no isolamento térmico e na redução de fricção. As camadas helicoidais metálicas, também denominadas de armaduras, representam as principais características estruturais. Essas camadas helicoidais consistem em arames ou tiras metálicas enroladas sobre um núcleo polimérico. As camadas metálicas asseguram pequena rigidez flexional ao conjunto. São complacentes para a flexão lateral, mas resistente à tração axial e à torção, capaz de sustentar pressão externa e uma parcela razoável de pressão interna de fluido.

Dentro do contexto de exploração em grandes profundidades, as linhas flexíveis têm desempenhado um papel fundamental por conjugar boas propriedades de resistência aos esforços incidentes de tração, torção, compressão axial, pressão interna e pressão externa, além de oferecer baixa rigidez à flexão. Essas características combinadas tornam os dutos flexíveis adequados à aplicação no escoamento de fluidos, quando comparados aos dutos rígidos de aço. Os dutos flexíveis, possuem camadas que movimentam-se relativamente de acordo com o esforço aplicado à linha. Tal fato possibilita que o flexível possa atingir grandes curvaturas, quando comparado aos dutos rígidos (SILVA, 2006).

Mesmo assim, essas estruturas estão sujeitas a carregamentos excessivas e falhas críticas que podem ser evitadas mediante inspeções periódicas, identificação dos modos de falha e mecanismos de degradação. Para a classificação e descrição funcional das camadas estruturais de dutos flexíveis poderão ser investigados os trabalhos de NOGUEIRA (2008), LEMOS (2005), SOUSA (2005), ALFARO (2003), API17J (2002) ou SMITH *et al.* (2007).

Uma estrutura típica de um duto flexível não-aderente está apresentada na Figura 1 abaixo. Nesta figura são ilustradas os tipos de camadas e algumas seções, à direita da figura, que formam a carcaça interna e a camada espiral zeta (barreira de pressão).



Figura 1 : Seção de um riser flexível (JUNIOR, 2006a).

2.2 – Falhas/Danos em Dutos Flexíveis Submarinos

Carregamentos excessivos podem iniciar falhas significativas que acarretam mecanismos de falhas críticos para a estrutura do duto flexível. Esta seção procura apresentar alguns trabalhos que auxiliaram a criação dos mecanismos de falhas de dutos flexíveis submarinos (Anexos 1 e 2).

Para o reconhecimento de não-conformidades (danos) dos mecanismos de falhas em dutos flexíveis, é interessante revisar os trabalhos sobre o gerenciamento de integridade estrutural de risers, e incidência de danos acidentais ou operacionais em regiões críticas do duto flexível.

MCS (2002) analisa a incidência das falhas e danos encontrados em risers e flowlines ao longo de alguns anos de operação no Mar do Norte. A análise revela que, para risers e flowlines, o espaço anular com presença de agentes corrosivos (CO_2 , H_2S e água do mar), danos na capa externa e a degradação ou envelhecimento da poliamida

(PA-11) na barreira de vedação correspondem aos mecanismos de falhas/danos em operação de maior incidência de ocorrência. No entanto, os danos de ruptura da barreira de vedação, falha (vazamento) de dispositivo auxiliar e colapso da carcaça apresentam ocorrência moderada. Sendo a menor incidência observada nos danos de corrosão das armaduras de tração, vazamento do conector (end-fitting), entupimento do duto e colapso da camada de pressão (zeta).

MCS (2001) revela que os danos acidentais relacionados à capa externa de risers são os mais relevantes, uma vez que ocorrem com maior frequência durante sua instalação. As falhas (ou danos) ocorridas na capa externa durante a operação são evidenciadas nos quatro primeiros anos de serviço do duto.

BOTTO *et al.* (2008) confirmam em suas estatísticas que a maior detecção de danos em dutos flexíveis se dá nos primeiros anos de operação. Em gerenciamento de envelhecimento de dutos flexíveis, BOTTO *et al.* (2008) consideram que os principais modos de falhas que influenciam esse fenômeno e devem ser priorizados na avaliação de sua integridade estrutural são: degradação do polímero da barreira de vedação, fadiga do material, corrosão, desgaste da capa externa (interface I-tube) e condições do espaço anular do duto.

A figura abaixo (Figura 2) indica o percentual de incidência de danos em dutos flexíveis entre 2002 e 2007.

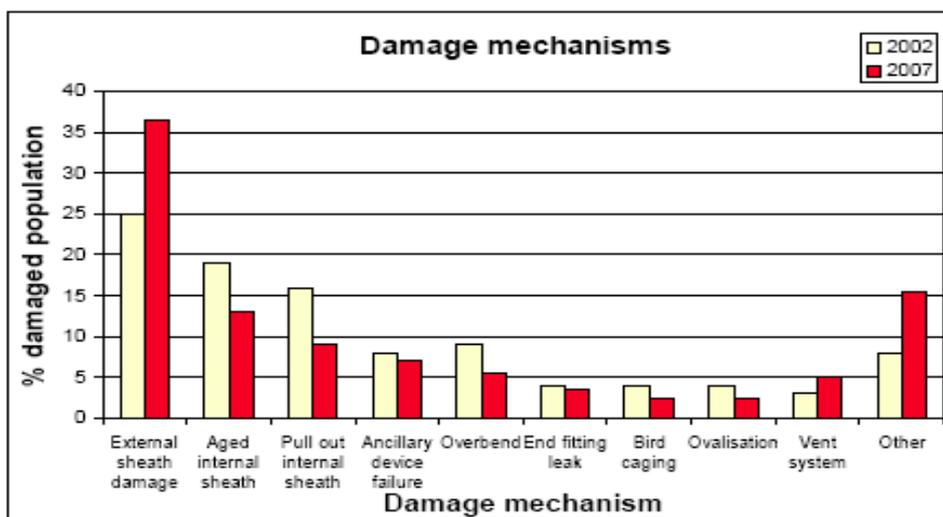


Figura 2 : Incidência de danos/falhas em dutos flexíveis submarinos (BOTTO *et al.*, 2008).

A Figura 2 mostra que a segunda maior incidência de danos corresponde ao envelhecimento da barreira de vedação. Neste momento é interessante o leitor observar as condições de envelhecimento e degradação da poliamida 11 de dutos flexíveis relatados em API 17TR2 (2003) e ALMEIDA *et al.* (2005). Os outros danos que a Figura 2 se refere tratam-se de: torção excessiva, corrosão, fratura da PVDF, falha de end fitting, fadiga da barreira de vedação, entupimento.

Sobre o gerenciamento de integridade estrutural de risers flexíveis não-aderentes é interessante ressaltar os trabalhos de PICKSLEY *et al.* (2002), VAN DE LOO *et al.* (1995), ZHANG *et al.* (2003), WILLIAMS *et al.* (2003) e CHEZHIAN *et al.* (2007). Segundo os autores, a identificação de pontos críticos na estrutura do riser, bem como a definição da estratégia de inspeção, monitoramento e manutenção, representam etapas fundamentais para evitar a perda de integridade do duto.

CAMERINI *et al.* (2008), HENRY (2004), LEMOS (2005) e WILLIAMS (2003), afirmam que a seção de topo do riser corresponde uma região crítica de maior índice de danos. Os autores destacam que a ruptura localizada dos arames da armadura de tração, trincas ou ruptura de bend stiffener, instabilidade torcional, flexões excessivas e ângulos inadequados de catenária, abrasão ou ruptura da capa externa, correspondem às falhas mais comuns da conexão riser/end fitting. BERGE *et al.* (1992) sugerem de forma simplificada o fluxograma de falha dos dutos flexíveis com apenas os modos de falha que possam impedir o transporte de fluídos (Figura 3).

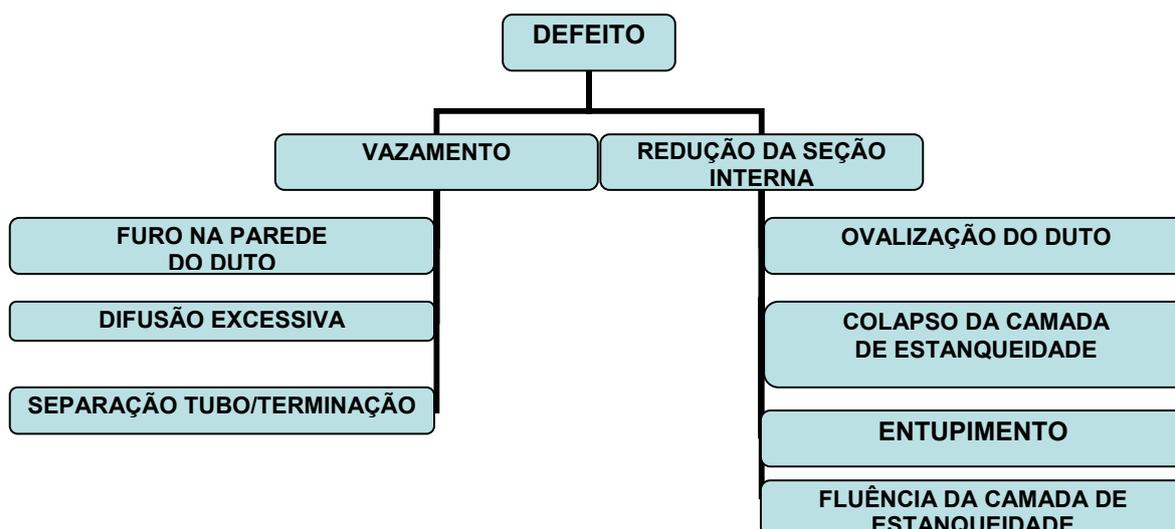


Figura 3: Fluxograma de falha aplicada a tubos flexíveis sugerido por BERGE *et al.* (1992).

NOGUEIRA (2008) e ZHANG *et al.* (2003) registram que cada camada metálica apresenta suas formas de instabilidade estrutural associadas a determinados carregamentos. Os trabalhos afirmam que os danos mais críticos em dutos flexíveis sujeitos a instalação em águas ultraprofundas são: fadiga das armaduras metálicas (seção de topo), instabilidade estrutural por colapso hidrostático devido à pressão externa excessiva, ou por flambagem lateral das armaduras de tração.

A seguir, serão apresentadas algumas não-conformidades observáveis durante inspeção relacionadas à capa polimérica externa de dutos flexíveis, segundo a literatura acadêmica (Figuras 4 até 7).



Figura 4: Dano (rasgo ou corte) da capa externa gerada pela entrada do Bend Stiffener no I-tube (MARINHO *et al.*, 2006).



Figura 5: Ruptura generalizada da capa externa (COSTA, 2002).

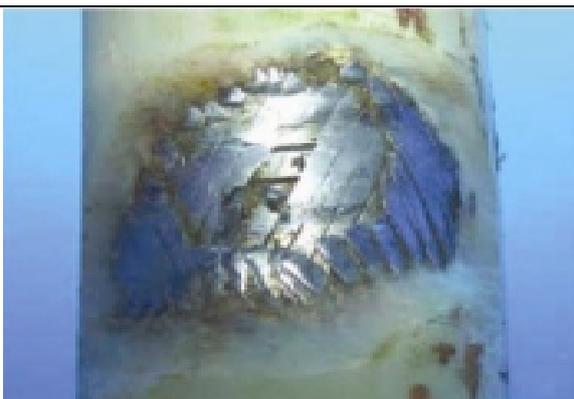


Figura 6: Ruptura localizada de arames da armadura de tração devido a abrasão da capa externa (MARINHO *et al.*, 2007).



Figura 7 : Torção excessiva do riser na seção de topo devido a ruptura de arames da armadura de tração (MARINHO *et al.*, 2007).

SIMÕES *et al.* (2001,2003) alertam que carregamentos excessivos de tração, torque, pressão externa e flexão, podem ocasionar: colapso, instabilidade estrutural entre as camadas, flambagem das camadas de tração (“gaiola de passarinho”), formações e fechamento de laços (looping e kinking), degradação mecânica por desgaste ou fadiga, degradação do material (devido à exposição a fluídos internos ou temperaturas excessivas). Enquanto que XAVIER (2006) alerta que a torção induzida durante o lançamento torna-se maior quando associada à baixa temperatura da água e à pressão externa. A seguir, ocorrerá a apresentação de algumas não-conformidades observáveis durante inspeção relacionadas à ruptura de arames da armadura de tração de dutos flexíveis (Figuras 8 até 11).



Figura 8 : Corrosão de arames da armadura de tração e desgaste da capa externa (COSTA , 2002).



Figura 9: Ruptura generalizada de arames da armadura de tração e corrosão avançada de arames (COSTA , 2002).



Figura 10: Ruptura generalizada de arames da armadura de tração na seção de topo (SIMÕES *et al.*, 2003).



Figura 11: Instabilidade estrutural (“Gaiola de Passarinho”).

SOUSA (2005) relata as principais falhas em risers, suas possíveis causas e conseqüências geradas a cada camada do duto. A norma API RP 17B (2002) apresenta uma extensa lista de possíveis danos em dutos flexíveis de aplicação dinâmica e estática e suas possíveis causas e conseqüências. Porém o documento não descreve a ligação das não-conformidades intermediárias com os eventos iniciadores do mecanismo de dano (causa) e os modos de falha finais (conseqüência) no duto flexível.

2.3 – Técnicas de Inspeção/ Monitoramento de Dutos Flexíveis Submarinos

A avaliação da integridade de dutos flexíveis é parte de um processo que visa aumentar a segurança operacional dessa estrutura. Os estágios dos mecanismos falhas em pontos críticos do duto podem ser detectáveis em diversos tipos de monitoramento e inspeção. Neste contexto, é interessante revisar trabalhos sobre inspeção visual, técnicas de monitoramento e reparo e inspeção baseada em risco (IBR).

Para detectar mecanismos de falhas o mais cedo possível e evitar o progresso de danos em dutos flexíveis surge à necessidade de investigar as principais referências sobre as técnicas de inspeção e monitoramento de dutos flexíveis em serviço.

Para a inspeção/monitoramento da conexão de topo (riser/end fitting), capa externa, dispositivos auxiliares, mal posicionamento da embarcação (FPSO) e reparo de dutos flexíveis recomenda-se os trabalhos de MARINHO *et al.* (2007), HENRY (2004), MCS (2001, 2002), CAMERINI *et al.* (2008), CARNEVAL *et al.* (2005) e API RP 17B (2002). Os autores avaliam estratégias de gerenciamento para assegurar a integridade estrutural de dutos flexíveis com camadas não-aderentes.

As técnicas de inspeção/monitoramento buscam informações relevantes para a descoberta dos mecanismos de falhas de dutos flexíveis. Neste contexto, o conhecimento dos modos de falha que geram diferentes mecanismos de degradação, permite ao inspetor organizar planos de inspeção que acompanhem a evolução desses mecanismos atuantes e seu impacto sobre sua integridade estrutural (PEZZI, 2003).

Ainda sobre avaliação e gerenciamento de integridade de risers flexíveis é importante observar algumas técnicas de manutenção e reparo de capa externa de risers durante inspeção visual (Figura 12), destacando MARINHO *et al.* (2002, 2006) e NETTO *et al.* (2008).

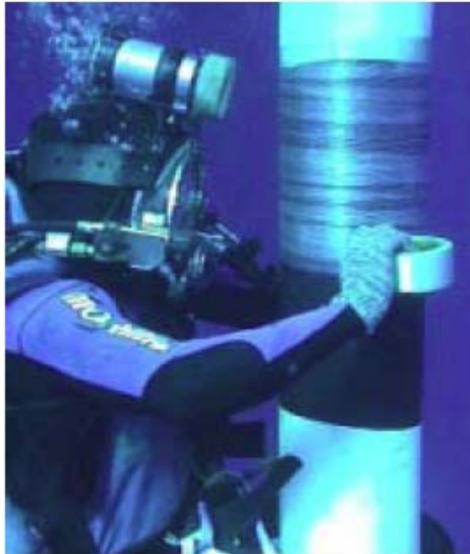


Figura 12 : Reparo da capa externa de riser flexível por aplicação de fita adesiva. (MARINHO *et al.*, 2006)

De acordo com NETTO *et al.* (2008), durante inspeções visuais é possível detectar danos (abrasão, ruptura, vazamento, deformações) na capa externa, falhas na válvula de alívio da seção de topo ou falhas na camada zeta, verificação de configuração inadequada de catenária, interferência entre risers ou entre risers e a embarcação, instabilidade torcional, ruptura de arames da armadura de tração, erro de posicionamento de embarcação (FPSO e FSO's), danos na seção de topo do riser flexível, danos no equipamento auxiliar, falhas na fixação ou envelhecimento do bend stiffener (degradação e ruptura), ingresso da água do mar no espaço anular.

SIMÕES *et al.* (2003) as principais causas de falhas investigadas em inspeções ou durante a manutenção de dutos flexíveis são: ruptura de arames causada por fadiga na interface I-tube/end fitting, perda de vedação da capa externa devido à degradação, corrosão da armadura de tração e da carcaça interna e instabilidade torcional.

Segundo SMITH *et al.* (2007) ressaltam que a presença de CO_2 e H_2S no espaço anular do riser, inicia um mecanismo de degradação com a combinação de corrosão-fadiga. A presença desses gases corrosivos reduz a vida à fadiga do riser, acelera o processo de corrosão e perda de material nas armaduras metálicas, gerando micro-trincas e deterioração do material.

2.4 – Inspeção Baseada em Risco (IBR)

A IBR é um método que define uma estratégia de monitoramento e inspeção baseada em riscos principais, onde a análise é realizada nos locais da estrutura que apresentem alto risco de falha (SIMÕES *et al.*, 2001). De acordo com os trabalhos de LOBIANCO *et al.* (2003) e SIMÕES *et al.* (2003), o método da Inspeção Baseada em Risco (IBR) de um modo geral trata-se de um processo de identificação, avaliação e mapeamento de riscos industriais capazes de comprometer a integridade estrutural de equipamentos. O objetivo da IBR é responder cinco questões fundamentais: *O que inspecionar? Onde inspecionar? Quando e como inspecionar? E, qual custo financeiro da inspeção?*

Segundo VAN DE LOO *et al.* (1995), e mais recentemente, STRAUB *et al.* (2005) e TIEN *et al.* (2007), a IBR abrange riscos que podem ser controlados mediante a otimização de inspeções periódicas. Durante o processo, a equipe de engenharia elabora a estratégia de inspeção adequada para os mecanismos de degradação correspondentes.

Segundo as principais empresas classificadoras de riscos e tendo como base o trabalho de SORENSEN (2006) e de CHEZHIAN (2007), dentre os benefícios que a técnica da IBR apresenta ao usuário que a utiliza, pode-se verificar:

- (●) Identificação, avaliação e mapeamento das áreas mais críticas da estrutura, possibilitando maior segurança, confiabilidade e tempo de operação da estrutura, além da otimização de custos financeiros;
- (●) Desenvolvimento de um banco de dados que inclua mecanismos de falhas/danos, modos de falhas e estratégias de inspeção/monitoramento em regiões mais críticas da estrutura.
- (●) Priorização de inspeções de equipamentos baseados na estimativa, cálculo e ranqueamento do risco de falha estrutural ;

Uma das etapas da implementação do programa da IBR corresponde o cálculo do risco de falha dos diversos componentes da estrutura. De acordo com os trabalhos de GARCIA *et al.* (2008), PEZZI (2003) e LOBIANCO *et al.* (2003) o cálculo do risco potencial de falha total de uma estrutura é tradicionalmente realizado pelo método de Probabilidade de Ocorrência de Falha (POR) e Conseqüência de Ocorrência de Falha (COR), mediante a interpretação da Matriz de Risco (Figura 13) por especialistas. Neste método qualitativo, o risco é definido a partir da combinação matricial da POR e COR, categorizadas em cinco níveis identificados. Segundo a API 581 (2000), o risco de falha

corresponde o produto da POR e COR, o qual fornece o nível do risco (baixo, médio, médio-alto ou alto) para todos os modos de falhas relevantes dos elementos da estrutura (Equação 1).

$$R_{FALHA} = POR * COR \quad (1)$$

Onde : R_{FALHA} = Risco Subjetivo definido pelo especialista , $1 \leq R_{FALHA} \leq 25$

POR = Probabilidade de Ocorrência de Falha , $1 \leq POR \leq 5$

COR = Conseqüência de Ocorrência de Falha , $1 \leq COR \leq 5$

MR		C O R				
		1	2	3	4	5
P O R	5	5	10	15	20	25
	4	4	8	12	16	20
	3	3	6	9	12	15
	2	2	4	6	8	10
	1	1	2	3	4	5

Figura 13 - Matriz de Risco (LOBIANCO *et al.*, 2003).

Após o cálculo do risco ocorre o ranqueamento dos componentes pela criticidade de falha, visando a priorização no planejamento de inspeção (TIEN, 2007, PICKSLEY, 2002). A principal técnica aplicada para indicar esta criticidade em componentes, equipamentos e sistemas é a Análise dos Modos, Efeitos e Criticidade de Falhas (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis - FMECA). Segundo SEYED-HOSSEINI *et al.* (2006) e GARCIA *et al.* (2005), a técnica FMECA é um procedimento de priorização de risco com base de experiência de especialistas empregando o conceito de número de prioridade de risco (Risk Priority Number - RPN).

O RPN corresponde ao produto entre a Probabilidade de Falha ou Não-conformidade (frequência de ocorrência), Conseqüência de Falha (grau de severidade) e Probabilidade de Não-Detecção de Falha. Este produto define qual componente do sistema deve ser priorizado em termos de criticidade (SINHA, 2007).

A aplicação da técnica de FMECA necessita de uma base quantitativa consistente, pois sofre de uma limitação importante no uso do RPN. Este conceito de RPN é inadequado, pois sofre de alocação não necessariamente válida de pesos iguais para os três fatores influentes na determinação de criticidade. Isto significa que a combinação de um valor baixo de grau de severidade com valores altos de frequência de ocorrência e de dificuldades de detecção pode indicar uma criticidade alta numa maneira equivocada. Essa limitação vem sendo superada pela aplicação da Análise por Envoltória de Dados (DEA) que será apresentado neste trabalho para o cálculo do risco em dutos flexíveis submarinos (Capítulo 6). Essa séria limitação no emprego do RPN foi reconhecida em vários trabalhos da literatura (SANKAR, 2001, KMENTA, 2004).

Para o aprofundamento do leitor, recomenda-se os importantes estudos de caso de aplicação da IBR em programas de gerenciamento de integridade. Uma visão geral de IBR em tubulações pode ser encontrada nas referências SINHA (2007) e TIEN *et al.*, (2007). PICKSLEY *et al.* (2002) e LOBIANCO *et al.* (2003) propuseram uma extensa metodologia de IBR para dutos flexíveis submarinos, mediante o cálculo do risco por Matriz de Risco e POR.

MACHADO *et al.* (2002) implementaram um programa de IBR em Unidades Estacionárias de Produção tipo FPSO ou FSO. O objetivo foi analisar a integridade estrutural do casco para a operação dessas embarcações, através da identificação de falhas em pontos mais críticos da estrutura.

PEZZI (2003) aplicou IBR a oleodutos terrestres segundo a avaliação de risco através da API 581 BRD (2000). A pesquisa comenta que a IBR se constitui no primeiro passo em direção a um programa de gerenciamento de risco.

SIMÕES *et al.* (2007) estenderam a técnica IBR para o gerenciamento da integridade de risers rígidos de catenárias (SCR), visando assegurar os riscos de falhas estruturais a níveis toleráveis. Vale ressaltar que, a diferença fundamental entre a IBR de dutos rígidos (SCR) e dutos flexíveis submarinos, estão na organização dos mecanismos de falhas dessas linhas.

Capítulo 3 - Análise por Envoltória de Dados (DEA - *Data Envelopment Analysis*)

3.1 - Origem Histórica

Segundo LINS (2000b) e MEZA *et al.*, (2005b) a história da Análise Envoltória de Dados (DEA) teve início com a dissertação de Edward Rhodes para obtenção de grau Ph.D, que foi supervisionada por Cooper e publicada por CHARNES *et al.*, (1978). O objetivo da tese foi desenvolver um método para comparar a eficiência através da avaliação do desempenho de programas educacionais de escolas públicas norte-americanas (Decision Making Units – DMU's).

De acordo com FORSUND (2002), a Análise Envoltória de Dados (DEA) é um método de Pesquisa Operacional não-paramétrico que tem como base a Programação matemática. O método destina-se a mensuração comparativa da eficiência entre unidades de mesma natureza e independentes entre si (empresas, departamentos, escolas, estruturas navais, hospitais, etc). A DEA compara o desempenho operacional de cada uma das unidades, através do cálculo e avaliação de suas eficiências relativas via programação linear (PL). Estas unidades diferenciam nas quantidades dos recursos consumidos (inputs) e das saídas produzidas (output). A técnica ainda permite a construção de uma superfície linear por partes (envoltória ou fronteira) não-paramétrica, envolvendo as eficiências das unidades analisadas (MEZA *et al.*,2005b) .

O modelo introduzido por Michael J. Farrell apresentava originalmente a formulação para apenas um produto e múltiplos insumos. Couberam a CHARNES *et al.*, (1978) generalizar o método aplicando com sucesso para múltiplas variáveis de entrada (insumos), e múltiplas variáveis de saída (produtos), permitindo o surgimento da DEA a partir da eficiência técnica definida por Michael J. Farrell em 1957 (RAMOS, 2007b).

3.2 – Objetivos - Modelo DEA

De acordo com LINS (2000b) e MEZA *et al.* (2005b) a DEA é um método para apoio à decisão de natureza multicritério, capaz de modelar a complexidade do mundo real, estimar uma função de produção empírica e propor melhoria de produtividade.

A metodologia clássica tem por finalidade utilizar técnicas de otimização de programação linear (Anexos 3 e 4) para calcular um índice de eficiência relativa que compare o desempenho dessas unidades analisadas. Os principais objetivos do método DEA podem ser resumidos da seguinte forma:

(i) Escolher um conjunto homogêneo de unidades que apresente em comum a utilização dos mesmos *inputs* e a produção dos mesmos *outputs*;

(ii) Auxiliar como ferramenta gerencial de apoio à decisão, que ofereça estratégias de produção que maximizem a eficiência das unidades avaliadas.

(iii) Identificar unidades eficientes (máximo desempenho operacional) e ineficientes (eficiência inferior a 100%). As unidades que obtiverem desempenho 1 ou 100% serão consideradas eficientes.

(iv) Oferecer ranqueamentos de unidades eficientes e ineficientes a partir da avaliação comparativa de desempenhos.

(v) Construir uma fronteira (envoltória) empírica de máxima eficiência relativa englobando dados empíricos, dentro de espaço multidimensional definido pelas variáveis de entrada (*inputs*) e de saída (*output*). Onde as unidades mais eficientes estarão sobre a envoltória (ou envelope) de eficiência, enquanto que as unidades menos eficientes localizam-se em sua região interna (BELLONI, 2000).

3.3 – Vantagens DEA

De acordo com SHNEIDER *et al.* (2009), KANESIRO (2008), KASSAI (2002) e CORREIA (2008), o sucesso em produzir a maior quantidade possível de *outputs*, dados vários *inputs* é uma das vantagens do uso da DEA. O modelo DEA apresenta algumas vantagens que justificam sua rápida disseminação, tanto em ambientes públicos como privados:

- (i) Incorporação simultânea de múltiplos inputs e outputs no cálculo de um único indicador de desempenho para as unidades do conjunto;
- (ii) Identificação de unidades ineficientes com maior precisão que técnicas paramétricas.
- (iii) Permite total flexibilidade na seleção prévia das variáveis de input e output e seus respectivos pesos de valor relativo para cada unidade. Esta seleção pode ser proveniente do conhecimento de especialistas ou usuários nas unidades analisadas.
- (iv) Determina a máxima eficiência relativa através da escolha de pesos de inputs (i) e outputs (j) com base em dados reais da unidade avaliada ;
- (v) Oferece proporcionalidade entre inputs (i) e outputs (j) na fronteira de eficiência, ou seja, o aumento na quantidade dos inputs, provocará acréscimo proporcional no valor dos outputs, e vice-versa.
- (vi) As variáveis de inputs e outputs podem ser medidos em diferentes unidades sem alterar o índice de eficiência, ou seja, os modelos DEA são invariantes com a escala de medida.
- (vii) Método não-paramétrico e empírico, ou seja, a medição do desempenho não necessita de uma relação funcional entre os inputs e outputs;

3.4 - Limitações Importantes dos Modelos DEA

O modelo DEA apresenta algumas fragilidades e limitações que deverão ser controladas e respeitadas pelo usuário. Sobre a metodologia DEA, KANESIRO (2008) ressalta uma regra imposta por CHARNES (1984), onde o sucesso da modelagem depende fundamentalmente de três fatores:

- (i) Escolha do tipo de modelo adequado (CCR ou BCC) : este fator é relevante para a identificação das unidades eficientes que representam a realidade do estudo de caso. A escolha indevida do tipo de modelo inviabiliza os resultados.
- (ii) Relação entre o número das variáveis (input e output) e a quantidade de unidades analisadas;
- (iii) Seleção correta de variáveis, evitando erros de informação que poderão invalidar os resultados, e assim, levar a conclusões totalmente incoerentes.

Estas limitações clássicas provocam muitas unidades localizadas sobre (ou fora) da fronteira de eficiência máxima ($E = 100\%$ ou 1), dificultando a identificação entre as unidades eficientes e ineficientes.

Segundo MELLO *et al.*, (2007), a redução do poder discriminatório da DEA ocorre em virtude da diferença excessiva entre os números de variáveis e unidades analisadas. Verifica-se normalmente que:

- (i) Se $n \circ \text{Variáveis} \gg n \circ \text{Unidades} \rightarrow \text{Baixo Poder Discriminatório}$: À medida que cresce o número de variáveis, aumenta a chance de muitas unidades serem 100% eficientes, ou seja, ficarem sobre a fronteira de máximo desempenho ($\text{Eficiência} = 1$). Neste caso, o uso de um grande número de variáveis tira todo o sentido dos modelos DEA básicos, pois diminui o seu poder discriminatório (LINS, 2000a).
- (ii) Se $n \circ \text{Variáveis} \ll n \circ \text{Unidades} \rightarrow (0 < \text{Eficiência} \leq 1)$: Muitas unidades estarão fora da fronteira de eficiência situadas no interior da envoltória. Poucas unidades apresentarão eficiência 100%, a DEA tende a reduzir a média das eficiências da amostra.

Para o controle do problema de baixo poder discriminatório é aconselhável estabelecer um ponto de equilíbrio entre a quantidade de variáveis e unidades escolhidas, obedecendo a recomendável empiricamente (CORREIA, 2008), Equação (2):

$$n \circ \text{Unidades}_{(DEA)} \cong \begin{cases} 2.(n \circ \text{Variáveis}) = 2.(n \circ \text{inputs} + n \circ \text{outputs}) \\ 3.(n \circ \text{Variáveis}) = 3.(n \circ \text{inputs} + n \circ \text{outputs}) \end{cases} \quad (2)$$

Na maioria dos casos reais onde existem poucas variáveis e muitas unidades, a opinião dos especialistas na seleção de variáveis não deve trazer grandes desvantagens ao modelo DEA (LINS, 2000b). Para controle de limitações MELLO *et al.* (2007) sugere restringir as variáveis selecionadas, enquanto que MEZA *et al.* (2005b) usa os modelos DEA avançado com restrições aos pesos para minimizar o problema na flexibilidade de seleção de pesos.

Vale ressaltar que, o incremento de muitas variáveis reduz a capacidade do DEA de discriminar as unidades eficientes das ineficientes. Portanto, a quantidade de unidades deve ser superior ao número de variáveis, e o modelo deve ser mantido o mais compacto possível para maximizar o poder discriminatório do DEA.

3.5 – Modelo Matemático DEA CCR Clássico

Esta seção tem como objetivo apresentar uma sinopse do estudo matemático dos modelos DEA CCR, através do estudo geométrico das possíveis fronteiras bidimensionais de eficiência, equações do modelo CCR fracionário e linear, cálculo das eficiências relativas para múltiplos inputs e outputs, além do caso particular para modelo CCR com um input e um output.

De acordo com MEZA (1998), LINS et al., (2002) e MELLO et al., (2007) as condições necessárias para a implementação adequada dos modelos DEA e estabelecimento da eficiência relativa são: definição e seleção do conjunto de unidades de mesma natureza a entrarem da análise; escolha do método de seleção de variáveis de entrada (inputs) e saída (output); escolha do tipo de modelo e sua orientação (se voltado para input ou output). Para o leitor interessado recomenda-se OLIVEIRA (2008) e KANESIRO (2008) para conhecer detalhes sobre a classificação dos modelos DEA quanto à orientação a inputs e outputs.

Com base em MEZA *et al.*, (2005b) o modelo CCR ou CRS (*Constant Returns to Scale*), tem como objetivos básicos: calcular a eficiência relativa e os pesos da variáveis (multiplicadores), identificar as unidades eficientes e ineficientes, propor metas de melhorias para a unidades ineficientes, determinando qual distância da fronteira de eficiência estas unidades devem “percorrer” para tornarem-se eficientes.

Este modelo tem como propriedade principal à proporcionalidade entre *inputs* e *outputs* na fronteira, ou seja, o aumento (ou redução) na quantidade dos *inputs*, provocará acréscimo (ou redução) proporcional no valor dos *outputs*. Abaixo serão apresentadas as metodologias de cálculos da eficiência relativa de unidades via modelo CCR.

3.5.1 – Caso Particular para 1 Input e 1 Output – DEA CCR

O cálculo da eficiência relativa em modelos CCR com orientação a outputs (saídas), mantendo constante os inputs (entradas) é demonstrado pelas equações 3 até 7. A fronteira de eficiência trata-se de uma reta inclinada passando pela origem do gráfico input (eixo x) *versus* output (eixo y), para o caso de 1 input e 1 output. A Figura 14 apresenta a fronteira de eficiência para o modelo DEA CCR e orientado a outputs.

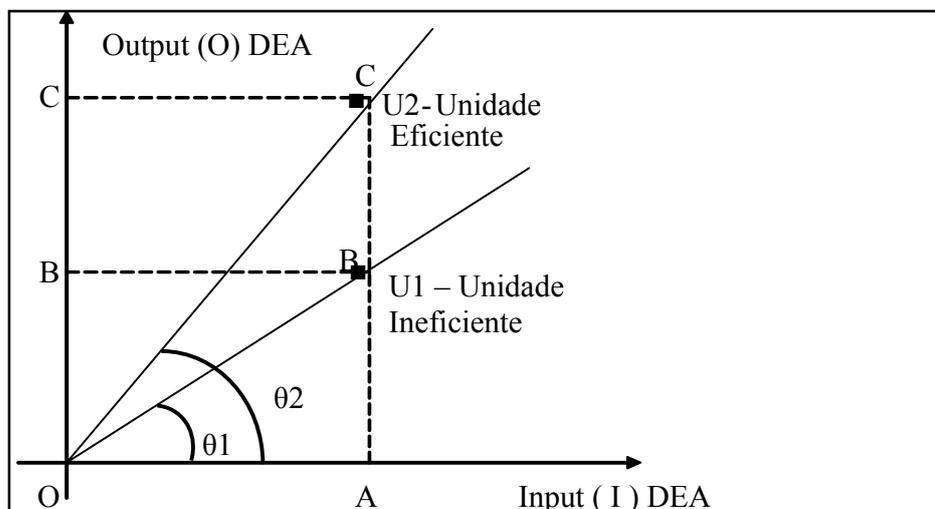


Figura 14: Fronteira de eficiência CCR/O para duas unidades U1 e U2 sob análise.

A análise gráfica permite constatar que : $tg\theta = \frac{output}{input} = \frac{O}{I}$ (3)

Onde a $tg\theta$ = eficiência das unidades DEA , obtendo a função linear:

$$O = E_K \cdot I \quad (\text{função Linear}) \quad (4)$$

A equação acima indica as variáveis de outputs são proporcionais as de inputs.

$$E_{U_1} = tg\theta_1 = \frac{\overline{AB}}{\overline{AO}} \quad (\text{eficiência da unidade } U_1) \quad (5)$$

$$E_{U_2} = tg\theta_2 = \frac{\overline{AC}}{\overline{AO}} \quad (\text{eficiência da unidade eficiente } U_2) \quad (6)$$

$$E_{U_1 \rightarrow U_2} = \frac{E_{U_1}}{E_{U_2}} = \frac{\overline{AB}/\overline{AO}}{\overline{AC}/\overline{AO}} = \frac{\overline{AB}}{\overline{AC}} \quad (7)$$

A Equação 7 indica a eficiência relativa da unidade ineficiente U_1 em relação a unidade eficiente U_2 . O conceito relativo da eficiência permite a comparação entre o que foi realizado por uma unidade ineficiente (produzido/gasto) e o que poderia ter sido realizado por uma unidade de referência.

$$Eficiência_{Unidade(k)} = \frac{(\text{peso Relativo}_j) \times (\text{Variável Output}_j)}{(\text{peso Relativo}_i) \times (\text{Variável Input}_i)} \quad (8)$$

3.5.2- Caso Multidimensional – DEA CCR

Para o caso de múltiplas variáveis (inputs - i e outputs - j), CHARNES *et al.* (1978) e COOPER *et al.* (2000, 2004) mostram que a eficiência relativa é o quociente entre soma ponderada dos outputs e soma ponderada dos inputs. Para uma unidade DEA (k) a soma ponderada dos outputs corresponde ao produto virtual entre o peso relativo e o valor da variável de output.

$$Eficiência_{Unidade(k)} = \frac{output(virtual)}{input(virtual)} = \frac{\sum_j (peso\ Relativo_j) x (Variável\ Output_{jk})}{\sum_i (peso\ Relativo_i) x (Variável\ Input_{ik})} \quad (9)$$

$$E_{U(k)} = \frac{\sum_j u_j \cdot y_{jk}}{\sum_i v_i \cdot x_{ik}} \quad (\text{Eficiência relativa DEA para múltiplas variáveis}) \quad (10)$$

Nas próximas seções serão identificadas as notações de modelagem bem como as restrições necessárias para formação do modelo CCR clássico fracionário e linear. Com relação a visualização gráfica das envoltórias nos casos multidimensionais, para 2 inputs e 1 output, ou 1 input e 2 outputs é possível construir a envoltória de eficiência ligando os pares ordenados $(Input_1/Output) \times (Input_2/Output)$ ou $(Output_1/Input) \times (Output_2/Input)$ obtidos pelos quocientes das variáveis de unidades eficientes. As figuras 15 e 16 abaixo mostram algumas envoltórias possíveis na modelagem DEA.

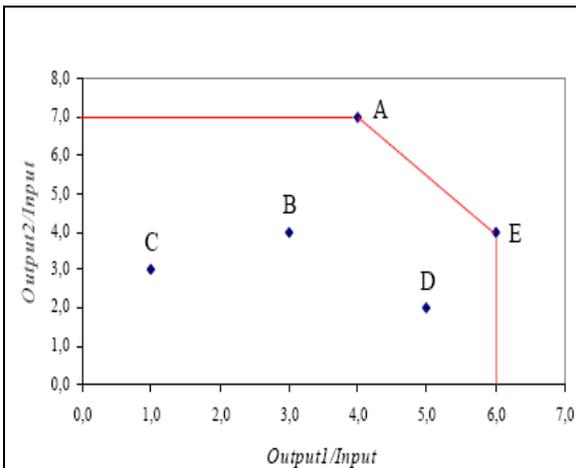


Figura 15: Interpretação gráfica do modelo de maximização CCR orientado a outputs (MEZA *et al.*, 2005b).

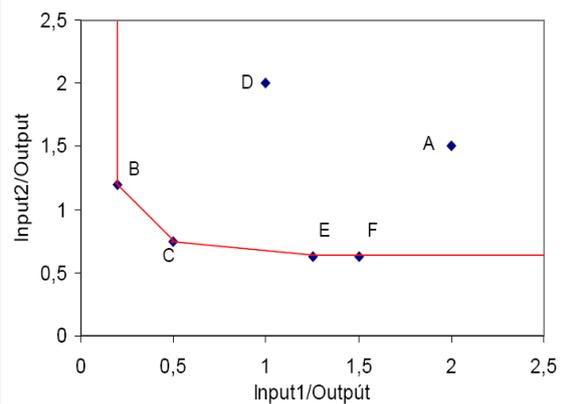


Figura 16: Envoltória de eficiência do modelo CCR orientado a inputs (MEZA *et al.*, 2005b). Nota-se que A e D são ineficientes, e B, C e E eficientes.

A Figura 15 acima apresenta a interpretação gráfica da envoltória do modelo CCR orientado a output, com 5 unidades, 2 outputs e 1 input. Observa-se que as unidades eficientes (eficiência unitária) são A e E por estarem sobre a envoltória. Enquanto que, as unidades ineficientes são B,C e D por pertencerem à região interna da envoltória de máxima eficiência. Na Figura 16 verifica-se o caso CCR orientado a inputs para 3 variáveis (2 inputs e 1 output) e 6 unidades.

O modelo BCC não será tratado neste trabalho, ficando a cargo do leitor interessado, o aprofundamento em BANKER *et al.* (1984), SHNEIDER *et al.* (2009) ou LINS (2000b).

3.5.3 – Eficiência Relativa do Modelo DEA CCR Multidimensional

A eficiência de uma unidade pode ser determinada maximizando a razão entre a soma ponderada de múltiplos *outputs* (*saídas ou produtos*) e a soma ponderada de múltiplos *inputs* (*entradas ou insumos*) (CHARNES *et al.*, 1978). O resultado deste procedimento resulta em um conjunto de valores de eficiência menores do que 1 (unidades ineficientes) ou iguais a 1 (unidade eficiente). Estes valores permitem avaliar, comparar e ranquear o desempenho relativo das unidades do modelo. Tendo em vista os trabalhos didáticos de COOPER *et al.* (2004), RAMOS (2007a), MEZA *et al.*, (2005b) e (LINS, 2000b) sobre a teoria e metodologia do modelo DEA CCR clássico, abaixo são apresentadas as seguintes notações de modelagem:

i – índice para input DEA - $i \in r$

j – índice para output DEA - $j \in s$

k – índice para número total de unidades analisadas ;

z – índice da unidade particular analisada (unidade base) - $z \in k$;

r – número total de inputs (entrada DEA) ;

s – número total de outputs (saída DEA) ;

x_{iz} – fator do input (i) na unidade base (z) : variáveis de entrada na DEA ($i = 1, \dots, r$) ;

y_{jz} – fator do output (j) na unidade base (z) : variáveis de saída na DEA ($j = 1, \dots, s$) ;

v_{iz} – peso atribuído ao input (i) na unidade base (z) ;

u_{jz} – peso atribuído ao output (j) na unidade base (z);

E_z – Eficiência Relativa da unidade base (z);

O modelo DEA CCR clássico, trata-se de um problema de programação fracionária que deve ser resolvido para cada unidade (z). A formulação deste modelo gera um Problema de Programação Não-Linear para cada unidade sob análise. Desta forma, a eficiência relativa DEA das unidades será:

$$EFICIÊNCIA_{unidade(K)} = \frac{\sum_{j=1}^s \text{PesoOutput}_{(jz)} \cdot \text{FatorOutput}_{(jK)}}{\sum_{i=1}^r \text{PesoInput}_{(iz)} \cdot \text{FatorInput}_{(iK)}} \quad (11)$$

$$E_{z \in k} = \frac{\sum_{j=1}^s u_{jz} \cdot y_{jK}}{\sum_{i=1}^r v_{iz} \cdot x_{iK}} \quad (12)$$

Como foi dito, a DEA reúne em índices únicos as múltiplas variáveis consideradas no modelo. Desenvolvendo as somatórias acima,

$$E_{z \in k} = \frac{u_{1z} \cdot y_{1K} + u_{2z} \cdot y_{2K} + \dots + u_{sz} \cdot y_{sK}}{v_{1z} \cdot x_{1K} + v_{2z} \cdot x_{2K} + \dots + v_{rz} \cdot x_{rK}}, \text{ ou ainda,} \quad (13)$$

Que deverá ser maximizada, sabendo que neste momento a maximização da eficiência é para a unidade z arbitrária pertencente ao conjunto total de K unidades ($z \in k$), dada pela função (14) a seguir :

$$Max(E_{k=z}) = Max \left(\frac{\sum_{j=1}^s u_{jz} \cdot y_{jz}}{\sum_{i=1}^r v_{jz} \cdot x_{iz}} \right) \quad (14)$$

• Sujeito a restrições:

(i) A equação (15) abaixo representa a restrição que garante a razão entre a soma ponderada dos outputs e input não seja maior do que 1 , permitindo que o nível de eficiência para qualquer unidade não exceda 1 unidade.

$$\frac{\sum_{j=1}^s u_{jz} \cdot y_{jk}}{\sum_{i=1}^r v_{iz} \cdot x_{ik}} \leq 1 \quad \text{ou} \quad \sum_{j=1}^s u_{jz} \cdot y_{jk} - \sum_{i=1}^r v_{iz} \cdot x_{ik} \leq 0, \quad \forall k \quad (15)$$

(ii) A equação (16) corresponde a restrição que garante a não negatividade dos pesos de output e input .

$$u_{jz} \geq 0 \quad \text{e} \quad v_{iz} \geq 0 \quad (16)$$

$$z = 1, \dots, k, \quad (k \neq z); \quad j = 1, \dots, s \quad (j \in s); \quad i = 1, \dots, r \quad (i \in r)$$

A solução do problema de programação matemática gerado corresponde a obtenção dos valores de u_{jz} e v_{iz} para cada unidade produtiva sob análise z , a fim de maximizar sua eficiência relativa (E_z). Os valores de x_{iz} e y_{jz} são dados numéricos fornecidos por especialistas, usuários, pesquisas científicas, estatísticas, entre outros.

3.5.4- Modelo DEA CCR Multiplicador - Problema de Programação Linear

O modelo apresentado pelas Equações (11 até 16) da seção anterior é de programação linear fracionária, que deve ser resolvido neste caso para cada unidade e pode ser transformado em um problema de programação linear (PPL) não-fracionário. Para evitar a não-linearidade e infinitas soluções do modelo, NUNAMAKER (1987) e COOPER *et al* (2000) sugerem que o denominador da função objetivo deva ser igual ao valor 1 (um). Esta modificação considera a soma ponderada de inputs DEA igual à unidade, assegurando a modificação do modelo DEA para um Problema de Programação

Linear (PPL), resolvido pelo Algoritmo Simplex (Anexo 4). Desta forma, o modelo é linearizado para (Equação 17) :

$$Max(E_{k=z}) = Max\left(\sum_{j=1}^s u_{jz} \cdot y_{jz}\right) \quad (17)$$

Sujeito a :

$$\sum_{i=1}^r v_{iz} \cdot y_{jz} = 1$$

$$\sum_{j=1}^s u_{jk} \cdot y_{jk} - \sum_{i=1}^r v_{ik} \cdot x_{ik} \leq 0, \forall k$$

$$v_{iz} \geq 0; u_{iz} \geq 0, \forall i, j$$

3.5.5 – Modelos DEA CCR com Input Unitário – Caso Particular

De acordo com MELLO (2006) e JUNIOR (2007) é possível utilizar modelos dos multiplicadores para a maximização da soma ponderada dos *outputs*, com *input* unitário, desde que seja orientado a *outputs*. Utilizando as mesmas notações anteriores, o modelo DEA CCR (Multiplicador) linearizado com *input* unitário, é tal que:

$$Max(E_{k=z}) = Max\left(\sum_{j=1}^s u_{jz} \cdot y_{jz}\right) \quad (18)$$

Sujeito as restrições :

$$(1) \sum_{j=1}^s u_{jk} \cdot y_{jk} \leq 1, \forall k$$

$$(2) u_{jz} \geq 0, \forall j, (j = 1, 2, \dots, s); (z = 1, 2, \dots, k)$$

$$(3) \sum_{i=1}^r v_{iz} \cdot x_{iz} = 1$$

Onde são considerados : $v_{iz} = 1$ (peso de input) e $x_{iz} = 1$ (fator de input)

Por exemplo, a eficiência para a unidade $z = 1$ será :

$$E_{z=1} = u_{11} \cdot y_{11} + u_{21} \cdot y_{21} + \dots + u_{j1} \text{ (eficiência)}$$

$$u_{11} \cdot y_{1k} + u_{21} \cdot y_{2k} + \dots + u_{s1} \cdot y_{sk} \leq 1 \text{ e } u_{sk} \geq 0 \text{ (restrições)}$$

Vale ressaltar que a eficiência é determinada para cada unidade (z) analisada a partir do cálculo dos pesos u_{sk} pelo PPL . Os índices s e k são usados nas restrições

para indicar um sistema de inequações lineares com todos coeficientes y_{sk} aplicados para cada unidade.

Para determinar as eficiências relativas, um programa linear formado por um sistema de inequações lineares deve ser executado para cada unidade. A técnica mostra que para cada unidade analisada, formula-se um problema de otimização com o objetivo de determinar quais os valores que a unidade atribui aos multiplicadores u_{jz} de modo a ter a maior eficiência possível.

3.6- Modelo DEA Avançado com Restrição ao Peso

GALVÃO (2008) alerta sobre o problema da excessiva flexibilidade de atribuição de pesos para as variáveis nos modelos DEA. Essa vantagem na escolha de pesos das variáveis (inputs e outputs), pode reduzir o poder discriminatório do modelo devido a falta de atribuição de prioridade e importância relativa de cada variável.

De acordo com LINS (2000b), esta limitação pode trazer resultados incoerentes com a realidade, uma vez que muitas unidades tornam-se eficientes. A limitação permite que:

- (i) Variáveis de menor importância possam dominar o estabelecimento da eficiência de uma unidade, isto é, podem ter pesos (u_{jk}) elevados pela DEA;
- (ii) Variáveis mais importantes possam ser ignorados da análise, o que acontece quando o PPL atribui um peso zero na variável respectiva.

LINS *et al.*, (2003) considera esta a maior limitação da estrutura matemática dos modelos clássicos, e recomendam a restrição à flexibilidade de pesos dos fatores em DEA mediante Restrição aos *inputs* e *outputs* virtuais.

A técnica de Restrição ao Peso corrige essa limitação e aumenta o poder de reconhecimento das unidades eficientes. A solução é estabelecer limites entre os quais os pesos podem variar permitindo certa flexibilidade e certa incerteza sobre o verdadeiro valor dos pesos.

No caso da variável output j , impõe-se a restrição da soma ponderada dos outputs total da unidade z . Esta restrição corresponde ao intervalo numérico $[\phi_j, \psi_j]$ de “importância” que o decisor ou usuário atribuem a variável j para na unidade z (LINS, 2000b). Desta forma, a restrição adicional ao modelo será:

$$\phi_j \leq \frac{u_{jz} \cdot y_{jz}}{\sum_{j=1}^s u_{jz} \cdot y_{jz}} \leq \psi_j \quad (19)$$

onde $\sum_{j=1}^s u_{jz} \cdot y_{jz}$ representa o output virtual total da unidade z . Uma restrição semelhante pode ser dada aos inputs virtuais.

3.7 – Aplicações Interdisciplinares

O modelo DEA apresenta aplicações em diversas áreas, tais como, setor nuclear (GARCIA *et al.*, 2005), economia (GATTOUFI *et al.*, 2004), educação (MEZA, 1998), setor hospitalar (GONÇALVES *et al.*, 2007), cooperativas de crédito rural (VILELA, 2004), companhias aéreas brasileiras (CORREIA, 2008, MELLO, 2003c).

MEZA (2009) avalia a eficiência de equipes do sistema de manufatura no setor siderúrgico através da utilização de modelos básicos. O trabalho usou DEA avançado de restrição ao peso para aumentar o poder discriminatório do método. RAMOS (2007a) aplicou o modelo DEA para avaliar o desempenho de instituições de ensino tecnológica no Brasil. SEIFORD *et al.* (1994), COOPER *et al.* (2004) e GOMES (2006) apresentaram trabalhos sobre a metodologia, teoria e aplicabilidade do modelo DEA. COOPER *et al.*, (2000) publicaram um livro exclusivamente sobre o DEA, com a discussão detalhada e didática de modelos DEA avançados e clássicos.

LINS (2000b) editou o primeiro livro de DEA em português. Este trabalho tratou dos modelos DEA clássico, seleção de variáveis, modelos com restrições aos pesos e avaliação cruzada. Vale ressaltar que LINS (2006a) resume a teoria da programação linear, método simplex e destaca a avaliação de desempenho a partir do uso da metodologia DEA. LINS *et al.*, (2006b) avaliam o desempenho operacional de refinarias de petróleo através do método DEA, com base em dados de operação. Buscou-se detectar as refinarias que operem mais e menos eficientemente seus recursos.

MELLO *et al.* (2003a) determinaram a eficiência dos programas de engenharia da COPPE, baseado no modelo CCR com e sem restrição aos pesos. MELLO *et al.* (2007) discutiram sobre a problemática da seleção das variáveis utilizadas na modelagem.

Recomenda-se ao leitor interessado MACEDO (2003), onde é observado um exemplo numérico ilustrativo sobre a aplicação do modelo DEA CCR de maximização, orientado a input, com a utilização de duas entradas (inputs) e uma saída (output).

Capítulo 4 – Metodologia de Inspeção Baseada em Risco (IBR) para Linhas Flexíveis Submarinas

Cargas operacionais podem exceder níveis previstos do projeto e a deterioração de materiais pode ser maior do que a antecipada. As inspeções baseadas em risco determinam os níveis de falhas e danos do sistema. O planejamento IBR considera o risco de falha estrutural de forma implícita e auditável. A IBR procura identificar claramente os dutos mais e menos críticos, evitando inspeções desnecessárias.

Segundo LOBIANCO *et al.*, (2003), TIEN *et al.* (2007) e PICKSLEY *et al.* (2002). Um programa de Gerenciamento de Integridade busca evitar incidentes que possam causar: perda de vida humana ou lesão, poluição ambiental, perda de produção e danos ao equipamento durante a instalação. Os altos custos operacionais com monitoramento, inspeção e manutenção dos sistemas de linhas flexíveis submarinas, justificam a preocupação em gerenciar a inspeção de modo otimizado.

A metodologia para avaliação de integridade estrutural de dutos flexíveis segue um roteiro motivado pelo método de IBR de linhas rígidas segundo SIMÕES *et al.* (2001). Desta forma, o presente capítulo procura contribuir para a implementação da IBR de dutos flexíveis oferecendo uma metodologia que permita: identificar os mecanismos de falhas dos pontos mais críticos de dutos flexíveis e implementação do modelo computacional DEA para a determinação de risco de falha total. A metodologia proposta possui as seguintes fases:

1º Fase) - Subdivisão do sistema de linhas flexíveis (trechos estático e dinâmico)

A subdivisão do sistema de dutos flexíveis depende da natureza dos modos de falha dos pontos mais críticos. O duto pode ser separado em dois trechos : flowline ou riser (seção de topo e intermediário) , além dos equipamentos auxiliares (bend stiffener, flutuadores e conectores). A subdivisão do sistema de linhas flexíveis em trecho estática (flowline) ou dinâmica / estática (riser), depende da natureza de carregamentos (tração, flexão ou torção) que o duto está sendo submetido durante a operação.

2° Fase) - Determinação dos parâmetros operacionais de serviço do sistema de linhas flexíveis

- ▶ análise do fluido interno – composição (água, gás ou óleo) , pressão de operação (baixa ou alta) e temperatura (baixa ou alta);
- ▶ ambiente externo - profundidade de instalação (rasa, média ou alta) e carregamento ambientais ;
- ▶ presença de agentes corrosivos como dióxido de carbono (CO₂) e sulfeto de hidrogênio (H₂S) no espaço anular do duto ;
- ▶ solo marinho abrasivo;
- ▶ duto em trincheira.

3° Fase) - Investigação das Não-conformidades Observáveis em Inspeção

Nesta fase deverá ocorrer a listagem das não-conformidades observáveis durante inspeção (*NCI_s*) organizadas de acordo com a natureza da camada do flexível. Este conjunto de informações consiste nos dados de inspeção visual realizada pelo mergulhador ou monitoramento por câmeras (ROV). A inspeção visual consiste na técnica de inspeção e monitoramento de integridade de dutos flexíveis escolhida neste trabalho. Para a avaliação de risco na estrutura de dutos flexíveis serão apresentadas duas categoriais de falhas potenciais em dutos flexíveis:

- **1° Categoria - Não- Conformidade Observável em Inspeção (*NCI_s*)** –
Correspondem a danos ou falhas identificadas por inspeção visual (mergulhador ou sistema de câmeras) durante a operação do duto. Em mecanismos de degradação de dutos flexíveis, significam os estágios que levam ao modo de falha final da estrutura. Uma não-conformidade pode ser um evento iniciador de um mecanismo de falha, ou está presente ao longo deste. Na seção 5.1 ocorrerá a apresentação da listagem completa dessas falhas.

■ 2° Categoria – Não-Conformidade Não Observável em Inspeção ($NCNO_s$)–

As $NCNO$ não são detectáveis visualmente durante inspeção, assim não fazem parte dos estágios que formam a seqüência dos mecanismos de falha. No entanto, as $NCNO_s$ potencializam ou precipitam várias NCI_s , participando implicitamente de todos os mecanismos de falhas. São consideradas $NCNO_s$: tração axial, compressões radial e axial excessivas; carregamento térmico (temperaturas excessivas); pressões internas / externas excessivas; defeitos ocorridos durante a fabricação, transporte e instalação do duto; danos acidentais (queda de objetos); mal posicionamento da embarcação.

4° Fase) - Investigação dos modos de falha potenciais de dutos flexíveis ;

Após a identificação das não conformidades encontradas durante a inspeção visual, deverá ser listado todos os modos de falha potenciais de acordo com a região mais crítica da linha. A partir da natureza da camada (metálica ou polimérica) ou do equipamento auxiliar da linha (bend stiffener ou flutuadores), as NCI_s deverão ser organizadas no modo de falha correspondente, podendo aparecer simultaneamente em mais de um modo de falha. Para dutos flexíveis offshore, os principais fenômenos físicos que auxiliam e marcam presença na identificação dos modos de falhas principais são: instabilidade estrutural (colapso e destravamento), deformação excessiva (ruptura) e fadiga, para as camadas metálicas, além do envelhecimento químico e fluência das camadas poliméricas. Na seção de número 5.3 ocorrerá a apresentação da listagem completa dos principais modos de falha investigados neste trabalho.

5° Fase) – Construção dos Mecanismos de Falhas potenciais de dutos flexíveis;

Este passo consiste na montagem dos mecanismos de falhas subdivididos em estágios ou NCI_s necessários para atingir o MF ou estágio final dos MCF_s . A identificação dos modos de falha potenciais permite a organização das não-conformidades observáveis de acordo com a natureza e função específica de cada camada. Cada modo de falha possuirá um conjunto de mecanismos de falha constituído por estágios que correspondem as não-conformidades de inspeção. Quanto menor for o número de não conformidades de um mecanismo, mais crítica e rápida será a perda total

de integridade da linha. Nos anexos (1) e (2) ocorrerá a apresentação da listagem completa dos mecanismos de falha de linhas flexíveis. Esta fase contribui a IBR de dutos flexíveis, uma vez que permite o cálculo dos fatores de risco.

6° Fase) – Avaliação Semi-Quantitativa: Cálculo do Risco Relativo pelo Método DEA

O cálculo do risco relativo de um duto flexível será possível a partir da identificação dos mecanismos de falha dessas estruturas. Neste caso, cada mecanismo de falha fornece os pesos das não conformidades associadas aos modos de falhas em questão. Esses pesos são denominados pesos subjetivos, e correspondem aos dados de entrada do modelo computacional baseado no método da Análise por Envoltória de Dados (DEA – Data Envelopment Analysis), cuja descrição completa ocorrerá no capítulo 6.

O risco relativo é determinado através da resolução de um PPL (programa de programação linear) gerado pela aplicação do modelo DEA para priorização de risco em dutos flexíveis.

7° passo) – Ranqueamento do Risco Relativo de Falha

Os fatores de risco permitem o ranqueamento dos dutos mais e menos críticos. Os dutos mais críticos apresentam maior fator de risco e grande tendência na perda de integridade estrutural, pois apresentam rápidos mecanismos de falhas com eventos próximos ao modo de falha final. Isso significa menor mecanismo de falha, logo baixo tempo de ocorrência para perda total de produção do sistema.

Enquanto que dutos com fatores de risco inferiores a um (1) serão considerados menos críticos, e estarão nas últimas posições do ranqueamento DEA. Estes dutos apresentarão mecanismos de falhas com grande (ou média) número de não conformidades de inspeção. Conseqüentemente, possuirão maior intervalo de tempo para atingir o modo de falha final. O ranqueamento de risco (DEA) servirá como um subsídio para a inspecionar dutos flexíveis.

A Figura 17 mostra o fluxograma de metodologia para o gerenciamento de integridade e inspeção de dutos flexíveis baseada em risco.



Figura 17: Fluxograma de Metodologia de Inspeção Baseada em Risco de Dutos Flexíveis.

Capítulo 5 – Mecanismos de Falha, Modos de Falha e Não-Conformidades de Dutos Flexíveis

5.1 – Não Conformidades de Inspeção Observáveis e Não-Observáveis em Dutos Flexíveis (Dados de Inspeção)

Atualmente, inspeções visuais periódicas realizadas com o auxílio de escaldores industriais (região emersa), mergulhadores (pequenas profundidades, usualmente inferiores a 50 m) e “remotely operated vehicles” (ROVs) formam a fonte primária de informações sobre as eventuais não-conformidades (falhas ou danos ou *NCI*) de um duto flexível em operação. Muitos são os motivos que ocasionam essas não-conformidades que podem ser detectáveis ou não durante inspeção de dutos flexíveis. O mal posicionamento da UEP, a interferência entre risers, carregamentos excessivos ou a ação hostil do ambiente marinho são alguns dos vários motivos que criam as *NCI*. A presença de uma *NCI* não implica na parada de produção do duto flexível. Deve ficar bem claro que a perda total de integridade estrutural da linha marca o estágio final do mecanismo de degradação correspondente. A este estágio final denomina-se Modo de Falha (*MF*)

A principal limitação da inspeção visual externa se refere às não-conformidades das camadas internas, geralmente não-detectáveis por esse tipo de inspeção principalmente quando ainda em seus estágios iniciais. No entanto, ao longo do desenvolvimento desse trabalho, não-conformidades tais como corrosão da carcaça, das armaduras de pressão e tração serão consideradas como dados de inspeção detectáveis, tendo em vista a existência de diversas técnicas de inspeção e monitoramento interno de dutos flexíveis (MARINHO *et al.*, 2006, 2007).

A ação combinada ou isolada dos carregamentos excessivos, envelhecimento do material, micro-trincas, etc, serão considerados Não-conformidades Não Observáveis (NCNO), por constituírem os eventos ou fenômenos físicos ocorridos antes da inspeção visual, ou de difícil detecção durante a inspeção do duto flexível. As NCNO não devem

fazer parte dos mecanismos de falha, porém são importantes na precipitação de algumas *NCI* observáveis.

As Tabelas 1 até 4 abaixo registram as principais *NCI* observáveis e não observáveis adotadas neste trabalho, e sua correspondência com o tipo de aplicação (estática - *flowline* ou dinâmica – *risers*) em dutos flexíveis submarinos.

Tabela 1 :Não-conformidades de Inspeção Detectáveis em Dutos Flexíveis Submarinos

CÓDIGO <i>Dado de Inspeção</i>	Não-conformidades Observáveis em Inspeção (NCI) de Dutos Flexíveis	Trecho de Ocorrência no DUTO FLEXÍVEL
NCI 1	<i>Dano Localizado na Capa Externa (furo, fissura, trinca)</i>	Riser / Flowline
NCI 2	<i>Dano Generalizado na Capa Externa (ruptura, rasgo)</i>	Riser / Flowline
NCI 3	<i>Dano superficial da Capa Externa (Abrasão / desgaste, corte)</i>	Riser / Flowline
NCI 4	<i>Ruptura localizada de arames da armadura de tração</i>	Riser
NCI 5	<i>Torção excessiva</i>	Riser / Flowline
NCI 6	<i>Vão livre excessivo</i>	Flowline
NCI 7	<i>Ovalização excessiva (mossas ou danos localizados)</i>	Riser / Flowline
NCI 8	<i>kink (Curvatura excessiva localizada)</i>	Riser / Flowline
NCI 9	<i>Curvatura excessiva</i>	Riser / Flowline
NCI 10	<i>Ausência de uraduct</i>	Riser
NCI 11	<i>Ângulo de Catenária Inadequado</i>	Riser
NCI 12	<i>Falha na válvula de alívio do end fitting (bloqueio ou vazamento)</i>	Riser
NCI 13	<i>Gaiola de passarinho</i>	Riser / Flowline
NCI 14	<i>Interferência entre dutos (Cruzamento)</i>	Riser / Flowline
NCI 15	<i>Espaço Anular com presença de agentes corrosivos (CO₂, H₂S, água do mar)</i>	Riser / Flowline
NCI 16	<i>Loop do Duto</i>	Flowline

Tabela 2 :Não-conformidades de Inspeção Detectáveis em Dutos Flexíveis Submarinos
(Continuação)

CÓDIGO Dado de Inspeção	Não-conformidades Observáveis em Inspeção (NCI) de Dutos Flexíveis	Trecho de Ocorrência no DUTO FLEXÍVEL
NCI 17	<i>Perda de flutuadores</i>	Riser
NCI 18	<i>Desprendimento do Bending Stiffener (região de Topo)</i>	Riser
NCI 19	<i>Ruptura do Bending Stiffener (região de TOPO) - Perda de funcionalidade</i>	Riser
NCI 20	<i>Dano superficial no Bending Stiffener (abrasão, trinca, fissura - Região de Topo)</i>	Riser
NCI 21	<i>Deformação excessiva da capa externa</i>	Riser / Flowline

Tabela 3: NCNO consideradas NCI para dutos flexíveis.

CÓDIGO Dado de Inspeção	Não-conformidades Não Observáveis em Inspeção (NCNO) consideradas NCI de Dutos Flexíveis (Eventos Internos)	Trecho de Ocorrência no DUTO FLEXÍVEL
NCI 22	<i>Corrosão – Carcaça Interna</i>	
NCI 22 L	<i>Leve</i>	Riser / Flowline
NCI 22 M	<i>Moderada</i>	Riser / Flowline
NCI 22 A	<i>Alta</i>	Riser / Flowline
NCI 23	<i>Corrosão - Arames (Armadura de Tração)</i>	
NCI 23 L	<i>Leve</i>	Riser
NCI 23 M	<i>Moderada</i>	Riser
NCI 23 A	<i>Alta</i>	Riser
NCI 24	<i>Corrosão da Armadura de Pressão</i>	
NCI 24 L	<i>Leve</i>	Riser / Flowline
NCI 24 M	<i>Moderada</i>	Riser / Flowline
NCI 24 A	<i>Alta</i>	Riser / Flowline

Tabela 4 : NCNO considerada NCI para Barreira de Vedação.

CÓDIGO <i>Dado de Inspeção</i>	Não-conformidades Não Observáveis em Inspeção (NCNO) consideradas NCI de Dutos Flexíveis Barreira de Vedação - Eventos Internos	Trecho de Ocorrência no DUTO FLEXÍVEL
NCI 25	<i>Trinca Localizada na Barreira de Vedação</i>	Riser / Flowline
NCI 26	<i>Trinca Generalizada na Barreira de Vedação (fragilização)</i>	Riser / Flowline
NCI 27	<i>Extrusão da Barreira de Vedação</i>	Riser / Flowline
NCI 28	<i>Fissura (ou furo) da Barreira de Vedação</i>	Riser / Flowline
NCI 29	<i>Destravamento localizado da armadura de pressão</i>	Flowline

As não-conformidades de inspeção relatadas pelas Tabelas 1 até 4 , correspondem ao conjunto das falhas ou danos que compõem a seqüência de eventos que formam os mecanismos de falha de dutos flexíveis. A presença de uma ou várias *NCI's* não impossibilita a perda de integridade estrutural do duto. Elas podem apenas exigir que novas condições de operação (pressões externa e interna, temperatura, etc) sejam estabelecidas, ou mesmo não impor qualquer restrição de operação ao duto.

As *NCI's* vistas acima ocorrem durante os mecanismos de falhas até o penúltimo estágio que antecede o modo de falha final. Deve-se ressaltar que uma *NCI* é o estágio do dano observável que participa dos mecanismos particulares e o modo de falha é o estágio final que marca a perda total de capacidade operacional do duto.

5.2 – Dados Operacionais de Potencialização - (DO_{pot})

O reconhecimento das principais não-conformidades e modos de falhas durante a operação de dutos flexíveis, bem como das regiões com maior concentração de eventos relacionados a perda total de produção, pode ser realizado com maior precisão mediante a identificação dos parâmetros operacionais potencializadores (DO_{pot}) das não-conformidades .

Os dados operacionais potencializadores precipitam e aceleram o crescimento de algumas não-conformidades presentes no duto flexível, tornando-as mais críticas, tendo em vista as condições ambientais agressivas e hostis de operação. A maximização de uma não-conformidade implica na redução do tempo de ocorrência do mecanismo de falha, permitindo ao duto atingir mais rápido o estado final de falha (modo de falha).

Os parâmetros operacionais mais relevantes para o mecanismo de degradação de dutos flexíveis são indicados na Tabela 5. As correspondências entre os dados potencializadores e as respectivas não-conformidades precipitadas estão registradas nas Tabelas 6 até 9.

Tabela 5: Dados Operacionais de Potencialização.

CÓDIGO DO DADO OPERACIONAL	DADO OPERACIONAL POTENCIALIZADOR
	PROFUNDIDADE
DO1	ALTA
	TEMPERATURA EXCESSIVA DO FLUIDO
DO2	ALTA
	PRESSÃO DE OPERAÇÃO (INTERNA)
DO3	BAIXA
DO4	ALTA
DO5	PRESENÇA DE AGENTE CORROSIVO / QUÍMICO NO FLUIDO INTERNO (H₂S, CO₂)
DO6	SOLO MARINHO ABRASIVO
DO7	DUTO EM TRINCHEIRA
DO8	CARGAS AMBIENTAIS EXCESSIVAS

Tabela 6: Correspondências entre os Dados de Operação Potencializadores e Não-conformidades Precipitadas.

CÓDIGO DADO DE INSPEÇÃO	Não-conformidades Observáveis em Injeção (NCI) de Dutos Flexíveis Submarinos	DADO OPERACIONAL POTENCIALIZADOR
NCI 1	<i>Dano Localizado na Capa Externa (furo, fissura, trinca)</i>	DO6, DO7
NCI 2	<i>Dano Generalizado na Capa Externa (ruptura, rasgo)</i>	DO6, DO7
NCI 3	<i>Dano superficial da Capa Externa (Abrasão / desgaste, corte)</i>	DO6, DO7
NCI 4	<i>Ruptura localizada de arames da armadura de tração</i>	DO5, DO8
NCI 5	<i>Torção excessiva</i>	DO1, DO8
NCI 6	<i>Vão livre excessivo</i>	Não precipitada
NCI 7	<i>Ovalização excessiva (mossas ou danos localizados)</i>	Não precipitada
NCI 8	<i>kink (Curvatura excessiva localizada)</i>	DO1, DO7, DO8
NCI 9	<i>Curvatura excessiva</i>	DO1, DO7, DO8
NCI 10	<i>Ausência de uraduct</i>	Não precipitada
NCI 11	<i>Ângulo de Catenária Inadequado</i>	DO1,DO8
NCI 12	<i>Falha na válvula de alívio do end fiffing (bloqueio ou vazamento)</i>	DO4, DO5
NCI 13	<i>Gaiola de passarinho</i>	DO1, DO3, DO8
NCI 14	<i>Interferência entre dutos (Cruzamento)</i>	Não precipitada
NCI 15	<i>Espaço Anular com presença de agentes corrosivos (CO2, H2S, água do mar)</i>	DO5
NCI 16	<i>Loop do Tramo</i>	Não precipitada
NCI 17	<i>Perda de flutuadores</i>	DO8

Tabela 7: Correspondências entre os Dados de Operação Potencializadores e Não-conformidades Precipitadas (*continuação*) .

CÓDIGO DADO DE INSPEÇÃO	Não-conformidades Observáveis em Injeção (NCI) de Dutos Flexíveis Submarinos	DADO OPERACIONAL POTENCIALIZADOR
NCI 18	<i>Desprendimento do Bending Stiffener (região de Topo)</i>	DO8
NCI 19	<i>Ruptura do Bending Stiffener (região de TOPO) - Perda de funcionalidade</i>	DO8
NCI 20	<i>Dano superficial no Bending Stiffener (abrasão, trinca, fissura - Região de Topo)</i>	Não precipitada
NCI 21	<i>Deformação Excessiva da Capa Externa</i>	DO4, DO5

Tabela 8: Correspondências entre os Dados de Operação Potencializadores e Não-conformidades Não-observáveis Precipitadas.

CÓDIGO DADO DE INSPEÇÃO	Não-conformidade Não-observáveis em Inspeção (NCNO) consideradas NCI de dutos flexíveis – Eventos internos	DADO OPERACIONAL POTENCIALIZADOR
NCI 22	<i>Corrosão – Carcaça Interna</i>	DO5
NCI 22 L	<i>Leve</i>	
NCI 23	<i>Corrosão - Arames (Armadura de Tração)</i>	DO5
NCI 23 L	<i>Leve</i>	
NCI 24	<i>Corrosão da Armadura de Pressão</i>	DO5
NCI 24 L	<i>Leve</i>	

Tabela 9: Correspondências entre os Dados de Operação Potencializadores e Não-conformidades Precipitadas da barreira de vedação

CÓDIGO DADO DE INSPEÇÃO	NCNO considerada NCI Potencializadora da Ruptura (Vazamento) da Barreira de Vedação - Evento interno	DADO OPERACIONAL POTENCIALIZADOR
NCI 25	<i>Trinca Localizada na Barreira de Vedação</i>	DO2,DO4,DO5
NCI 26	<i>Trinca Generalizada na Barreira de Vedação (fragilização)</i>	DO2,DO4,DO5
NCI 27	<i>Extrusão da Barreira de Vedação</i>	DO4,DO5
NCI 28	<i>Fissura (ou furo) da Barreira de Vedação</i>	DO2,DO4,DO5
NCI 29	<i>Destravamento localizado da armadura de pressão (zeta)</i>	DO1,DO3,DO5, DO8

Desta forma, a partir da análise das tabelas de correspondências entre as Não Conformidades e os Dados Operacionais, verificam-se algumas conclusões:

- ⦿ O aumento de profundidade de instalação do duto maximiza as não-conformidades: destravamento da carcaça interna, curvatura excessiva localizada (kink), ângulo de catenária inadequado , torção excessiva no duto e gaiola de passarinho;
- ⦿ O solo marinho abrasivo precipita, por exemplo, dano superficial da capa externa, enquanto que duto em trincheira potencializa danos na capa externa e curvatura excessiva.
- ⦿ A falha da válvula de alívio é precipitada por elevada pressão de operação e presença de agentes corrosivos no espaço anular. A ação corrosiva de CO₂ e H₂S também potencializa ruptura localizada de arames, espaço anular alagado, e corrosão leve das camadas metálicas (zeta, tração e carcaça).
- ⦿ Cargas ambientais excessivas maximizam uma possível torção, gaiola de passarinho, curvatura excessiva, destravamento da carcaça, perda de flutuadores e falhas no bending stiffener.

5.3 – Modos de Falha em Dutos Flexíveis - (MF_S)

Os modos de falha (MF) correspondem ao estágio final de qualquer mecanismo de falha , sendo associados a perda de integridade estrutural no duto flexível (falha total) e a consequência parada de produção. A identificação correta dos MF significa uma etapa fundamental para a execução de programa de IBR proposta neste trabalho. Na Tabela 10 são apresentados sete modos de falha principais considerados nesse trabalho.

Os modos de falha e seus respectivos mecanismos serão separados em duas categorias, relacionada a natureza do trecho da linha flexível em serviço : trecho estático (FLOWLINE) ou dinâmico (RISER).

Para os Risers estão associados todos modos de falha mencionados. Os modos de falha relacionados a carregamentos de flexão, torção (em flowlines) e tração axial excessivos , e falhas na interface conector/riser (região de topo) , ocorrem com exclusividade no trecho dinâmico (MF2, MF4, MF5).

Para flowlines são aplicáveis somente os modos MF1, MF3, MF6 e MF7, os quais podem estar associados a presença de vão livre excessivo (relevo do leito marinho irregular) , loop duto , contato com solo marinho abrasivo, outros.

Tabela 10: Modos de Falhas Potenciais em Dutos Flexíveis Submarinos

CÓDIGO MODO DE FALHA	MODO DE FALHA - DUTOS FLEXÍVEIS SUBMARINOS	TRECHO DE OCORRÊNCIA NO DUTO
MF1	Falha da Carcaça Interna (Colapso ou Destravamento)	Riser/Flowline
MF2	Ruptura Generalizada de Arames da Armadura de Tração	Riser
MF3	Destravamento (ou Ruptura) da Armadura de Pressão (zeta)	Riser/Flowline
MF4	Perda de Estanqueidade do Conector (região de topo)	Riser
MF5	Deslizamento (ou Ruptura) da Armadura de Tração (interface riser/conector)	Riser
MF6	Entupimento ou Redução de Vazão	Riser/Flowline
MF7	Ruptura da Barreira de Vedação (vazamento)	Riser/Flowline

Na investigação dos modos de falhas potenciais de dutos flexíveis de aplicação dinâmica ou estática, é importante considerar a falha nos componentes auxiliares (conectores, flutuadores, enrijecedor de curvatura, válvula de alívio, etc). As falhas desses dispositivos consistem em não-conformidades iniciadoras ou intermediárias de uma grande quantidade de mecanismos de falha de dutos flexíveis. Por exemplo, a falha no bending stiffener permite uma curvatura excessiva da linha, potencializando um kink (curvatura excessiva localizada), ou mesmo o deslizamento da armadura de tração ou perda de estanqueidade do conector devido ao deslizamento da barreira de vedação (região de topo).

Tendo em vista a natureza das camadas do duto flexível, as armaduras e a carcaça interna de aço estão sujeitas a fenômenos de instabilidade estrutural, deformação excessiva e fadiga. Por outro lado, as camadas plásticas poliméricas ficam sujeitas,

durante a vida útil do duto, ao envelhecimento, a fluência, uma pequena parcela de fadiga e deformações excessivas.

O fluxograma a seguir apresenta a distribuição dos principais modos de falhas do sistema de dutos flexíveis submarinos organizados de acordo com o tipo de camada e o fenômeno físico/químico associado à instabilidade estrutural, deformação excessiva, fadiga, envelhecimento e fluência do material polimérico (Figura 18).

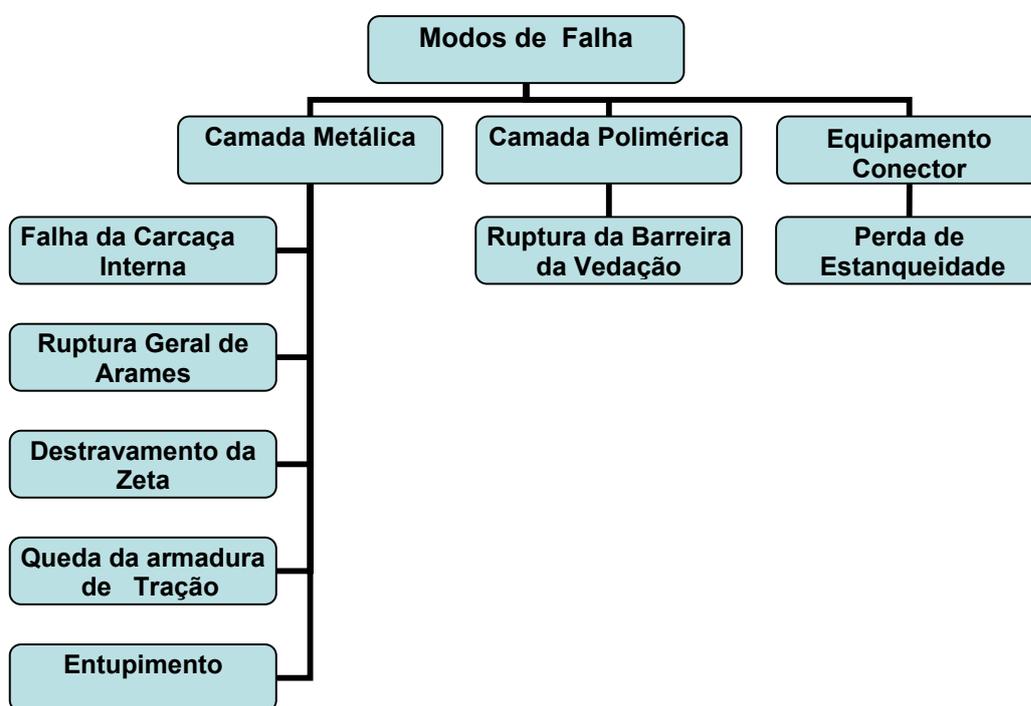


Figura 18: Árvore de Modos de Falhas Potenciais de Dutos Flexíveis Submarinos .

Vale mencionar que os modos de falha colapso da carcaça interna e destravamento ou ruptura da barreira de pressão são provocados por ovalizações e perda de intertravamento das seções, respectivamente. A ruptura de arames da armadura de tração está associada a deformação excessiva dessa camada, gerada por uma curvatura ou tração axial excessiva. Enquanto que o deslizamento (ou perda de ancoragem) dessa armadura é normalmente associada a ruptura dos arames causada por fadiga ou tração excessiva na região de topo.

O modo de falha perda de estanqueidade conector (equipamento auxiliar) é justificado pela fadiga do material neste ponto e deformações excessivas. Sendo a ruptura da barreira de vedação (camada polimérica de pressão interna) associada ao envelhecimento (degradação) ou fluência do material polimérico que a constitui.

5.4 – Mecanismos de Falha Potenciais de Dutos Flexíveis Submarinos - (MCF_s)

Os mecanismos de falha (MCF_s) de dutos flexíveis constituem uma seqüência de estágios que são denominados não-conformidades de inspeção (NCI_s), ou seja, as falhas ou danos que podem ocorrer durante a operação do duto.

A identificação dos mecanismos de falha de dutos flexíveis submarinos é etapa fundamental para o sucesso da aplicação do programa de IBR dessa estrutura. Após a determinação de seus modos de falha e suas NCI_s observáveis, surge a necessidade de organizá-los em mecanismos de degradação. Estes são compostos de uma seqüência de estágios que correspondem as NCI_s geradoras, intermediárias ou críticas detectáveis em inspeção visual. Cada mecanismo apresenta como estágio final o modo de falha crítico do duto, marcado pela perda total de produção (vazamento/ perda de estanqueidade) ou perda de integridade estrutural da linha (ruptura, destravamento, colapso, entupimento).

MECANISMO DE FALHA - Dutos Flexíveis Submarinos				
Estágio 1	Estágio 2	.....	Estágio (n-1)	Estágio (n)
LC = (n - 1)	$\Omega = (n - 2)$	.....	$\Omega = 1$	MODO DE FALHA
NCI Geradora	NCI Intermediária	.....	NCI (+ Crítica)	PERDA DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL

Figura 19 : Critério de construção dos mecanismos de falhas de dutos flexíveis.

A Figura 19 apresenta o critério de formação dos mecanismos de degradação de dutos flexíveis. Cada estágio (n) ou não conformidade de inspeção corresponde a uma coluna (Ω) do mecanismo. A ordem de ocorrência das NCI_s é da esquerda para a direita, sendo sua posição em cada coluna obtida em ordem decrescente a partir do primeiro estágio (coluna $n-1$). Este procedimento facilitará o cálculo dos pesos de cada NCI por interpolação linear no Capítulo 6.

Os mecanismos de falha são divididos em duas categorias, de acordo com a natureza de aplicação da linha flexível: estática (flowline) e dinâmica (riser). Os estágios são distribuídos de acordo com o número de modos de falha considerado para cada estrutura. O critério de sua formação é tal que, cada NCI é alocada em uma coluna e em ordem crescente de importância e aparecimento de acordo com o fenômeno físico/químico ocorrido.

Os mecanismos de falhas podem ter início na superfície do duto, no espaço anular da carcaça interna ou no espaço anular entre as camadas poliméricas e metálicas, até mesmo na falha de dispositivos auxiliares e no cruzamento entre dutos. Esses MCF_s serão mais rápidos e críticos, quanto menor for o número de não-conformidades (estágios). Aqueles que possuem maior número de estágios, serão menos críticos, uma vez que apresentam maior tempo de duração.

Sobre as não-conformidades não observáveis ($NCNO_s$) em inspeção visual, é importante lembrar, que contribuem para a formação dos MCF_s , porém as mesmas não serão indicadas nos estágios. Algumas $NCNO_s$ não indicadas em MCF_s são: tração axial excessiva na seção de topo do riser, erro de posicionamento da embarcação, pressão externa (ou interna) excessiva, impacto lateral ou pontual de objetos, compressão radial (e/ou axial) excessiva da armadura de tração, contato lateral entre os arames, envelhecimento do polímero da barreira de vedação interna, capa externa ou bending stiffener.

As vantagens observadas que motivam a identificação e o reconhecimento dos mecanismos de falhas de dutos flexíveis submarinos, correspondem a:

- Auxiliar o inspetor na seleção da técnica de inspeção apropriada bem como, na identificação de regiões mais críticas da linha durante a instalação e operação ;

- Identificar em estágios de MCF_s os parâmetros operacionais que precipitam as $NCI_{críticas}$ antes que elas ocorram ;
- Permitir o cálculo do risco a partir da subjetividade do especialista em dutos flexíveis;
- Identificar todas as $NCI_{críticas}$ intermediárias de ligação entre o evento iniciador da falha e o modo de falha final.

A seguir será realizada a investigação de alguns mecanismos de falha de dutos flexíveis, onde ocorrerá a análise da causa (evento iniciador do dano) e da consequência ou efeito que ela pode gerar a integridade estrutural do duto. Vale mencionar que, para um mecanismo de falha, uma mesma $NCI_{crítica}$ pode dar início a $NCI_{crítica}$ distintas, gerando MF_s iguais ou diferentes. Alguns dados operacionais que precipitam ou potencializam as NCI podem ser identificados nos estágios dos MCF_s , participando da justificativa técnica para ocorrência dos modos de falhas de dutos flexíveis e correspondentes mecanismos. Os anexos [1] e [2] apresentam a seqüência completa dos mecanismos de falhas de dutos flexíveis propostos nesta dissertação.

Dentre os MCF_s de aplicação dinâmica (Riser) no Anexo 1, destaca-se :

MF - Falha da Carcaça Interna (colapso ou destravamento)

- O erro de posicionamento da embarcação (UEP) pode provocar ângulo de catenária inadequado e curvatura excessiva na linha. Este mecanismo pode evoluir para uma curvatura excessiva localizada , potencializando uma ovalização inicial elevada da linha, gerando o colapso da carcaça interna.
- Danos superficiais, localizados e generalizados na capa externa, acarretam o seu rompimento provocando uma torção excessiva do duto, o qual gera a formação de gaiola de passarinho, seguida de destravamento da carcaça e o modo de falha de Colapso da Carcaça.

MF - Ruptura Generalizada de Arames da Armadura de Tração

- A interferência entre dutos provoca danos superficiais na capa externa (desgaste ou abrasão), acarretando possíveis fissuras, trincas ou furos na capa externa, os quais facilitam a entrada de água do mar ou gases corrosivos (CO_2 e H_2S). Iniciando-se o

processo de corrosão dos arames da armadura de tração, possibilitando a ruptura localizada de arames, e a torção excessiva do duto. O mecanismo fragiliza o duto permitindo a ruptura geral de arames.

MF - Destravamento (ou Ruptura Geral) da armadura de Pressão (riser)

- A formação de um ângulo inadequado de catenária inicia três possíveis mecanismos de perda de intertravamento da armadura de pressão. Esta falha provoca uma curvatura excessiva que eventualmente pode evoluir para a formação de um kink (curvatura excessiva localizada), gerando três não-conformidades que provocam o destravamento da armadura de pressão (perda total de integridade): ovalização excessiva, gaiola de passarinho ou torção excessiva na linha.

MF - Deslizamento (ou ruptura) da Armadura de Tração - Seção de Topo (riser)

- A interferência entre dutos e/ou bloqueio na válvula de alívio provocam danos na capa externa que acarretam o seu rompimento, permitindo o ingresso da água do mar ou de agentes corrosivos. O alagamento do espaço anular inicia o processo de corrosão dos arames da armadura de tração, fragilizando o material. O mecanismo pode ser agravado por rompimentos localizados nos arames no interior do end fitting, o qual gera a torção excessiva da linha na região de topo, e conseqüentemente, o deslizamento da armadura de tração.
- Outro mecanismo típico da seção de topo é iniciado por danos superficiais no bend stiffener (abrasão, trinca, fissura). Estas falhas provocam a ruptura e a perda de funcionalidade do enrijecedor de curvatura. Desta forma, o duto flexível é submetido a uma curvatura excessiva e a formação de kink na região de topo, acarretando a catastrófica perda de ancoragem da armadura de tração.

Os demais MCF_s de Riser e Flowlines são investigados nos anexos [1] e [2] .

Capítulo 6 - Modelo DEA de Maximização de Risco Relativo para Dutos Flexíveis Submarinos

6.1 – Objetivos

Como foi visto, o método DEA surgiu como uma técnica não-paramétrica, baseada em programação linear, capaz de agilizar avaliações e melhorias de desempenho de unidades que apresentam a mesma finalidade (TALLURI, 2000, FORSUND, 2002). O modelo DEA permite a comparação dessas unidades através de suas eficiências relativas.

A priorização de risco em dutos flexíveis em águas profundas está sendo proposta por esta dissertação como parte do roteiro apresentado na seção (4.1) do programa de inspeção baseada em risco de dutos flexíveis. Através da implementação do modelo DEA, será avaliado e comparado o risco de falha potencial para cada duto, a partir do ranqueamento das linhas mais críticas e menos críticas, com base em dados de inspeção, condições operacionais, modos de falhas e mecanismos de falhas.

Esta dissertação propõe o modelo DEA Risco para uso em IBR de dutos flexíveis submarinos, estabelecendo os seguintes objetivos principais:

- (i) Identificar os dutos flexíveis de máximo e mínimo risco de perda de integridade estrutural através da determinação semi-quantitativa dos fatores de risco ;
- (ii) Comparar dutos flexíveis via um fator de risco determinado pela DEA, sem uma alocação arbitrária de criticidade de eventos ocorridos;
- (iii) Usar os ranqueamentos DEA Risco de dutos flexíveis críticos em programas de IBR como apoio de tomada de decisões;
- (iv) Utilizar simultaneamente a opinião subjetiva de especialistas em dutos flexíveis submarinos e a programação linear (método simplex). Ver Anexos 3 e 4;
- (v) Incorporar dados reais de inspeção e operação proveniente dos MCF_s ;

Como principais vantagens do modelo de maximização DEA Risco em dutos flexíveis, destacam-se:

- (1) Não-dependência de modelos mecanísticos e/ou paramétricos, que exigem funções matemáticas explícitas;
- (2) Compartilhável entre vários dutos flexíveis em serviço;
- (3) Possui uma ligação clara com os processos de deterioração e envelhecimento de dutos flexíveis;
- (4) O risco correspondente para um mesmo duto pode ser calculado com vários conjuntos distintos de pesos subjetivos de inspeção e operação;
- (5) É integralmente compatível com procedimentos como FMECA (GARCIA, 2005);
- (6) Técnica com uma base matemática mais consistente (programação linear), substituindo o conceito do RPN;

6.2 – Metodologia do Programa Computacional DEA Risco para Dutos Flexíveis

Na metodologia convencional do DEA, os MF_s são conhecidos como variáveis de output (j), os fatores de risco relativo para dutos flexíveis ($R_{Duto(z)}$) é a eficiência (ou um desempenho indesejável em DEA), os pesos ξ_{zj} das NCI_s e DO_{pot} correspondem aos dados de entrada (pesos dos MF_s ou variáveis DEA) . Os pesos objetivos φ_{zj} significam os valores atribuídos pelo modelo DEA Risco para cada $NCI_{crítica}$ que representa o MF escolhido. Os valores de φ_{zj} deverão ser maximizadas pelo modelagem DEA Risco. As unidades DEA em avaliação serão os dutos flexíveis submarinos (z) .

No modelo DEA Risco para ranqueamentos de dutos flexíveis, o risco de falha potencial ($R_{Duto(z)}$) é igual a maximização da soma ponderada entre o conjunto de pesos subjetivos (ξ_{zj}) e objetivos (φ_{zj}) das $NCI_{críticas}$ ou DO_{pot} que representam o MF selecionado. A avaliação e priorização de risco correspondem a um problema de programação linear resolvido por softwares que implementam os modelos DEA.

O fluxograma da Figura 20 apresenta esquematicamente as etapas e procedimentos adotados na metodologia do modelo DEA risco proposta.

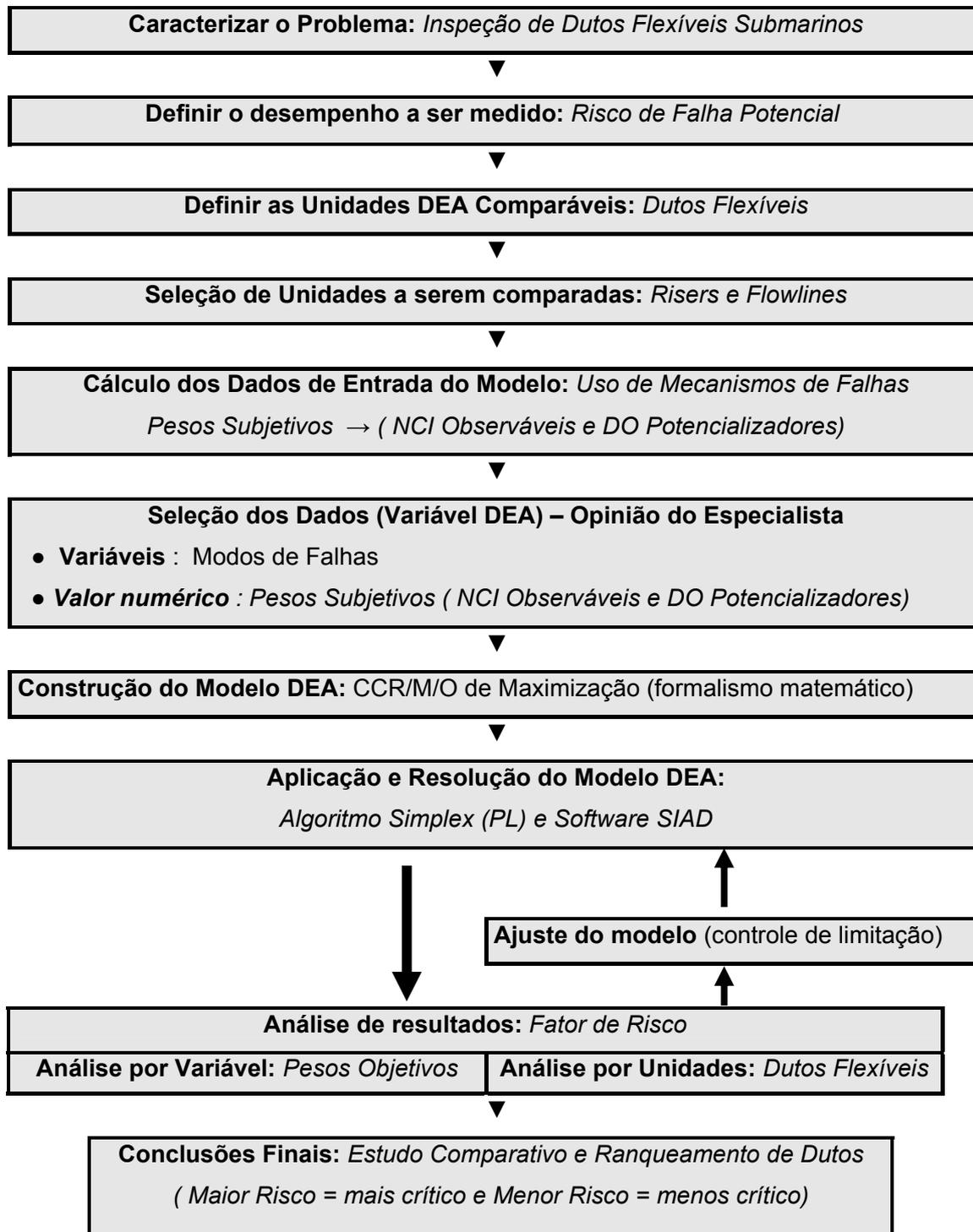


Figura 20 - Fluxograma de Metodologia do Modelo DEA Risco para Ranqueamento de Dutos Flexíveis Submarinos.

O processo de avaliação e maximização do risco para dutos flexíveis ocorre a partir de um modelo CCR de maximização orientado a output, multiplicador (M), com inputs unitários e constantes (JUNIOR, 2006b, MELLO, 2006). Como deseja-se maximizar os fatores de risco ($R_{Duto(z)}$) de falha de um duto flexível, o modelo deverá ser orientado a output para maximizar as saídas, ou seja, os pesos objetivos (φ_{zj}) dos MF_s para cada duto flexível. Durante a maximização, os pesos subjetivos (ξ_{zj}) serão sempre constantes.

O modelo de maximização DEA Risco escolhido para dutos flexíveis considera que os valores numéricos dos pesos subjetivos ξ_{zj} relacionados ao modo de falha são muito próximos e adimensionais. O modelo CCR permite uma avaliação de risco com maior caráter discriminatório que outros modelos básicos. Os pesos φ_{zj} são ditos multiplicadores (M) na terminologia DEA de programação linear.

6.3 – Modelo Matemático DEA para Avaliação de Risco em Dutos Flexíveis Submarinos

O modelo de DEA risco resulta num programa de programação linear (PPL) de maximização e cálculo dos pesos objetivos (φ_{zj}) de tal modo que o valor do fator de risco seja máximo para cada duto flexível. O modelo é composto pela função do fator de risco e por um sistema de k inequações de restrição, submetidos a restrição de não negatividade dos pesos objetivos (φ_{zj}). O número total de soluções é igual a quantidade de $NCI_{críticas}$ ou DO_{pot} considerados para cada duto, conseqüentemente igual ao número de pesos subjetivos (ξ_{zj}).

O Modelo DEA Risco oferece abordagem semi-quantitativa, pois o cálculo do $R_{Duto(z)}$ apresenta uma base matemática consistente via programação linear e método simplex (Anexos 3 e 4).

A Equação (20) mostra a interpretação dada ao processo de maximização e cálculo do risco relativo de dutos flexíveis mediante o método DEA.

$$Max(R_{Duto(z)}) = Max\left(\sum_{j=1}^s \xi_{ModoFalha(especialista)} * \varphi_{DEA(Pr ogramaçãoL inear)}\right) \quad (20)$$

onde, $\xi_{MF(e)} = \begin{cases} \xi_{NCI(+crítica)} \\ ou \\ \xi_{DO(pot)} \end{cases}$

$\xi_{NCI(+crítica)}$ – Peso Subjetivo da não conformidade mais crítica associada ao modo de falha. Valor numérico obtido por estimativa do especialista a partir dos mecanismos de falhas;

$\xi_{DO(pot)}$ – Peso Subjetivo do parâmetro operacional potencializador associada ao modo de falha. Valor numérico obtido por estimativa do especialista a partir dos mecanismos de falhas;

$\xi_{MF(e)}$ – Peso Subjetivo do modo de falha do duto flexível (z) atribuído pelo especialista.

6.3.1 – Interpretação Gráfica do Risco Relativo DEA

O método DEA permite a construção de superfícies envoltórias (envelopes bidimensionais) de alto risco, onde os dutos flexíveis de risco máximo estarão sobre a fronteira, e os de menores riscos ficarão no interior da envoltória.

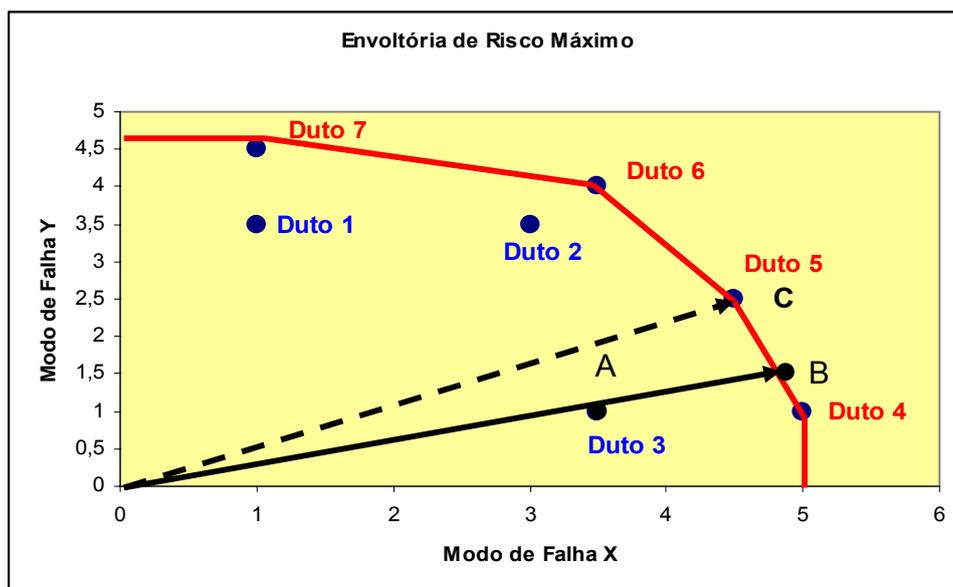


Figura 21: Envoltória bidimensional DEA de alto risco para dutos flexíveis submarinos.

A Figura 21 ilustra uma envoltória de alto risco para dutos flexíveis submarinos. A envoltória significa uma superfície linear por partes obtida mediante a ligação entre os pares ordenados $(MF_x; MF_y)$ dos dutos flexíveis mais críticos.

De acordo com a fronteira, os dutos flexíveis 4, 5, 6 e 7 são os mais críticos por estarem sobre a envoltória de risco. Enquanto que os dutos 1, 2 e 3 são os menos críticos, uma vez que se localizam no interior da fronteira DEA Risco. A figura permite a interpretação gráfica do risco relativo de dutos flexíveis, além da rápida discriminação entre dutos mais e menos críticos. A partir da envoltória de alto risco, obtém-se a seguir a interpretação analítica do risco.

■ Risco relativo de dutos menos críticos

$$R = \frac{\overline{OA}}{\overline{OB}} \times (\%) \rightarrow 0 < R < 1 \quad (21)$$

■ Risco relativo de dutos mais críticos (Risco Unitário)

$$R = \frac{\overline{OB}}{\overline{OB}} = 1 = 100\% \quad (22)$$

Para o duto 5, por exemplo, o risco relativo será: $R_5 = \frac{\overline{OC}}{\overline{OC}} = 1$. Verifica-se que, a eficiência relativa da DEA, considera a proximidade entre as unidades ineficientes e a fronteira de eficiência estimada (CASA NOVA *et al.*, 2007).

6.3.2 – Interpretação Analítica do Modelo DEA Risco Relativo

O modelo apresentado (CHARNES *et al.*, 1978) pelas equações 11 até 16 é de programação linear fracionária, que deve ser resolvido neste caso para cada unidade e pode ser transformado em um problema de programação linear (PPL) não-fracionário. Para evitar a não-linearidade do modelo, NUNAMAKER (1987) e COOPER *et al.*, (2000) sugerem que o denominador da função objetivo deva ser igual ao valor 1 (um).

Notação do Modelo DEA Risco

j – índice para modos de falhas (output DEA) ; $j = 1, 2, \dots, s; (j \in s)$

k – índice para número total de dutos; $k = 1, 2, \dots, n$

z – índice para duto base analisado (arbitrário) ; $z = 1, 2, \dots, k; (z \in k)$

φ_{zj} – peso objetivo associado ao modo de falha j no duto base z . Corresponde a variável de decisão computado pelo modelo matemático para cada duto flexível.

ξ_{zj} – peso subjetivo das $NCI_{críticas}$ observáveis ou DO_{pot} associados ao modo de falha j no duto base z ;

ξ_{kj} - peso subjetivo das $NCI_{críticas}$ observáveis ou DO_{pot} associados ao modo de falha j no duto k ;

α_{iz} – nível associado ao fator de input DEA (i) no duto base z ;

μ_{iz} – peso do fator de input DEA (i) no duto base z ;

$R_{Duto(z)}$ – fator de risco relativo do duto flexível base z ;

Os fatores de risco serão equivalentes a maximização da soma ponderada dos pesos objetivos (φ_{zj}) e subjetivos (ξ_{zj}) (Equação 23). Os pesos subjetivos (ξ_{kj}) são os dados de entrada do modelo. Desta forma, considerando os fatores de risco menores ou iguais a 1 , e seguindo os enfoques de BRADBURY (2002) e DAVUTYAN (2005). O modelo de programação linear para avaliação de risco em dutos flexíveis será apresentado em notação indicial (convenção do somatório), como segue abaixo.

Fator de Risco do Duto Flexível:

$$R_{Duto(z)} = Maximize (\xi_{jz} \cdot \varphi_{j(z)}) \quad (23)$$

Onde : ($j = 1, 2, \dots, s$) e ($z = 1, 2, \dots, k$)

Sujeito as restrições:

$$(i) \xi_{jk} \cdot \varphi_{j(z)} \leq 1 \quad , \quad j = 1, 2, \dots, s ; \quad z = 1, 2, \dots, k ; \quad \forall k = 1, 2, 3, \dots \quad (24)$$

$$(ii) \varphi_{j(z)} \geq 0 \quad (25)$$

$$j = 1, 2, \dots, s, (j \in s); z = 1, 2, \dots, k (z \in k)$$

$$(iii) \mu_{ik} \cdot \alpha_{iz} = 1 \text{ (soma ponderada dos inputs DEA em notação indicial)} \quad (26)$$

$$\mu_{ik} = 1 \text{ e } \alpha_{iz} = 1 \text{ (input DEA unitário)}$$

$$(i = 1, 2, \dots, r); (z = 1, 2, \dots, k)$$

Esse PPL corresponde ao modelo DEA CCR denominado “ Modelo dos Multiplicadores ”, sendo o conjunto de pesos (φ_{zj}) denominados de multiplicadores, que representam as variáveis de decisão não negativas.

O modelo de programação linear DEA acima envolve um conjunto de soluções de φ_{zj} para cada duto flexível base z ($z = 1, 2, \dots, k$), onde é determinado o fator de risco relativo $R_{Duto(z)}$ (Equação 23). Para todas os dutos serão impostas simultaneamente as restrições (i), (ii) e (iii), equações (24) até (26).

A função objetivo (23) a ser maximizada representa o fator de risco do duto z analisado. A restrição (24) garante que o fator de risco para cada duto é qualquer valor menor ou igual a 1. A restrição (25) garante a não-negatividade de pesos objetivos associados aos modos de falhas j do duto base z . A equação (26) garante a linearização do modelo, significa a condição que evita a inconsistência matemática em modelos sem inputs DEA.

Os pesos objetivos φ_{zj} serão computados pelo modelo DEA Risco com uso do software SIAD Versão 3.0 (MEZA *et al.*, 2005a), para cada modo de falha j no correspondente duto flexível z .

Os valores numéricos dos pesos dos dados de operação e inspeção ($NCI_{críticas}$), associados aos MF_s , serão utilizados para compor a matriz de entrada da modelagem representado na Tabela 11 a seguir.

Tabela 11: Matriz DEA do especialista (pesos subjetivos).

Unidade DEA (<i>k</i>)	Variável DEA Modo de Falha <i>j</i> = 1	Variável DEA Modo de Falha <i>j</i> = 2	Variável DEA Modo de Falha <i>j</i> = 3	Variável DEA Modo de Falha – <i>j</i> –	Input Unitário DEA (<i>i</i> = 1)
Duto 1	ξ_{11}	ξ_{12}	ξ_{13}	ξ_{1j}	1
Duto 2	ξ_{21}	ξ_{22}	ξ_{23}	ξ_{2j}	1
.....
Duto k	ξ_{k1}	ξ_{k2}	ξ_{k3}	ξ_{kj}	$\mu_{k1} = 1$

Onde:

ξ_{kj} – Peso subjetivo (ξ_{kj}) das $NCI_{críticas}$ ou DO_{pot} associado ao Modo de Falha *j* no duto flexível *k*.

μ_{k1} – Peso unitário dos inputs DEA para o duto *k*.

A utilização de inputs DEA unitário significa uma condição existencial da modelagem de maximização de risco. Não possui relação conceitual com a operação ou inspeção de dutos flexíveis.

6.3.3 – Interpretação Matricial do Risco Relativo DEA

A modelagem DEA Risco para dutos flexíveis submarinos trata-se de um problema de programação linear de maximização de risco potencial de falha, o qual pode ser representado em notação indicial e na forma matricial (Equações 27 e 28), como segue abaixo:

$$Risco\ Relativo_{Duto(z)} = Max(\xi_{jz} \cdot \varphi_{(z)j})$$

$$(j = 1, 2, 3, \dots, s); (z = 1, 2, 3, \dots, k)$$

Restrições:

$$(i) E_{k \times j} \cdot \Phi_{j \times 1} \leq U_{k \times 1}$$

$$(ii) \varphi_{zj} \geq 0$$

(27)

Aplicando para o primeiro duto flexível ($z = 1$), tem-se que:

$$R_{Duto(z=1)} = (\xi_{11} + \xi_{12} + \xi_{13} + \dots + \xi_{j1}).(\varphi_{(1)1} + \varphi_{(1)2} + \varphi_{(1)3} + \dots + \varphi_{(1)j})$$

$$R_{Duto(z=1)} = \xi_{11}\varphi_{(1)1} + \xi_{12}\varphi_{(1)2} + \xi_{13}\varphi_{(1)3} \dots + \xi_{j1}\varphi_{(1)j}$$

$$(j = 1, 2, 3, \dots, s); (z = 1, 2, 3, \dots, k)$$

Submetido a restrição matricial que gera o sistema de k inequações menores ou iguais a unidade (Equação 28).

$$\begin{bmatrix} \xi_{11} \dots \xi_{14} \dots \xi_{1j} \\ \xi_{21} \dots \xi_{24} \dots \xi_{2j} \\ \dots \\ \xi_{k1} \dots \xi_{k4} \dots \xi_{kj} \end{bmatrix}_{k \times j} * \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \dots \\ \varphi_j \end{bmatrix}_{(k)j \times 1} \leq \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix}_{k \times 1} \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} \xi_{11}\varphi_{(1)1} \dots \xi_{14}\varphi_{(1)4} \dots \xi_{1j}\varphi_{(1)j} \\ \xi_{21}\varphi_{(2)1} \dots \xi_{24}\varphi_{(2)4} \dots \xi_{2j}\varphi_{(2)j} \\ \dots \\ \xi_{k1}\varphi_{(k)1} \dots \xi_{k4}\varphi_{(k)4} \dots \xi_{kj}\varphi_{(k)j} \end{bmatrix}_{k \times j} \leq \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix}_{k \times 1} \quad (29)$$

Onde : E – Matriz do especialista ; Φ – Vetor Risco ; U – Vetor unitário

Cabe ressaltar que os elementos $\varphi_{(k)j}$ do vetor Risco ($\Phi_{j \times 1}$) representam o conjunto de soluções do PPL de risco (equação 13 até 16). Cada duto flexível possuirá um conjunto de solução $\varphi_{(k)j}$, sabendo que ele corresponde aos pesos objetivos do duto flexível (k) no modo de falha j . Na expressão do fator de risco $R_{Duto(z)}$, o índice z refere-se ao duto base analisado, indicando que cada rodada do programa obtém-se o risco relativo para o duto em questão.

A matriz $E_{k \times j}$ significa a matriz de entrada do modelo DEA definida pelo especialista a partir dos mecanismos de falhas de dutos flexíveis (Anexos 1 e 2). Cada elemento (ξ_{kj}) da matriz corresponde o peso subjetivo de uma $NCI_{crítica}$ ou DO_{pot} associados ao modo de falha escolhido.

Para compreender o processo de maximização do risco a partir da técnica DEA, a Tabela 12 mostra a matriz de entrada de uma modelagem arbitrária. Os valores numéricos significam os pesos subjetivos do especialista. O PPL apresentado pelas Equações 30 mostra a estrutura de formulação do fator de risco relativo para um duto arbitrário 2. O exemplo envolve um grupo de 7 risers que apresenta 3 modos de falhas com pesos subjetivos calculados a partir dos mecanismos de degradação (Anexos 1 e 2).

Tabela 12: Aplicação do método DEA – Matriz do especialista de pesos subjetivos.

Unidade DEA (k)	Variável DEA (j = 1) Modo de falha 1	Variável DEA (j = 2) Modo de falha 2	Variável DEA (j = 3) Modo de falha 3	Input Unitário DEA
Duto 1	5	4,5	5	1
Duto 2	4	4	1	1
Duto 3	3,5	4	1	1
Duto 4	3,5	4,5	1	1
Duto 5	4	4	5	1
Duto 6	3,5	1	5	1
Duto 7	4	4,5	1	1

Desta forma, o PPL para o duto flexível 2 é constituído pelo fator de risco sujeito as restrições abaixo:

$$R_{DUTO(z=2)} = 4\varphi_{(2)1} + 4\varphi_{(2)2} + 1\varphi_{(2)3} \text{ (fator de risco)}$$

$$5\varphi_{(1)1} + 4,5\varphi_{(1)2} + 5\varphi_{(1)3} \leq 1$$

$$4\varphi_{(2)1} + 4\varphi_{(2)2} + \varphi_{(2)3} \leq 1$$

$$3,5\varphi_{(3)1} + 4\varphi_{(3)2} + \varphi_{(3)3} \leq 1$$

$$3,5\varphi_{(4)1} + 4,5\varphi_{(4)2} + \varphi_{(4)3} \leq 1$$

$$4\varphi_{(5)1} + 4\varphi_{(5)2} + 5\varphi_{(5)3} \leq 1 \tag{30}$$

$$3,5\varphi_{(6)1} + \varphi_{(6)2} + 5\varphi_{(6)3} \leq 1$$

$$4\varphi_{(7)1} + 4,5\varphi_{(7)2} + \varphi_{(7)3} \leq 1$$

$$\varphi_{(k)j} \geq 0, (j = 1, \dots, 3), (k = 1, \dots, 7)$$

O mesmo mecanismo algébrico será repetido para os próximos 7 dutos flexíveis em cada uma das hipóteses consideradas, trocando-se apenas o fator de risco (função objetiva) . Gerando em cada hipótese um conjunto de PPLs que deverão ser rodados simultaneamente pelo software SIAD (Sistema Integrado de Apoio à Decisão) versão 3.0 (MEZA *et al.*,2005a). O SIAD implementa computacionalmente os modelos DEA clássicos (CCR) e avançados, resolvendo os PPLs da modelagem escolhida através do Algoritmo Simplex (Anexo 4) para o modelo dos Multiplicadores. O software roda simultaneamente os PPLs para cada duto flexível considerado, fornecendo os valores dos fatores de risco e pesos objetivos ($\varphi_{(k)j}$).

Para o controle de limitações no modelo DEA Risco é preciso observar a relação entre o número de dutos flexíveis e quantidade de modos de falhas utilizados. A inclusão de muitos modos de falhas podem colocar muitos dutos flexíveis sobre a fronteira de alto risco, inviabilizando a modelagem de risco. Para evitar uma alta concentração de dutos flexíveis sobre a fronteira de risco, deve-se atender a recomendação empírica (Equação 31):

$$n \circ DutosFlexíveis = \begin{cases} 2.(n \circ ModosFalhas + 1) \\ 3.(n \circ ModosFalhas + 1) \end{cases} \quad (31)$$

6.4 – Descrição do Estudo de Caso e Origem dos Dados

Para a determinação dos ranqueamentos comparativos gerado pelo modelo DEA, foi adotado um grupo máximo de 15 dutos flexíveis. As variáveis de entrada do modelo correspondem aos modos de falhas identificados a partir dos mecanismos de falhas em Anexos 1 e 2 . Cada *MF* foi subdividido em $NCI_{críticas}$ ou DO_{pot} correspondentes aos mecanismos de falhas que geram esses estágios críticos. As $NCI_{críticas}$ foram escolhidas de acordo com sua frequência de aparecimento em operação segundo diversos trabalhos (MARINHO, 2006, 2007, MCS 2001,2002).

Os pesos atribuídos aos modos de falhas serão provenientes dos pesos de cada $NCI_{críticas}$ ou DO_{pot} escolhidos. A seção a seguir indica o procedimento matemático adotado para o cálculo desses valores.

6.4.1 – Cálculo dos Pesos Subjetivos (Riser/Flowline)

Os pesos subjetivos (ξ_{jz}) das $NCI_{críticas}$ ou DO_{pot} serão utilizados para representar os modos de falhas dos dutos durante a modelagem DEA. Esta etapa é o momento onde pode-se incorporar dados oriundos da experiência e / ou opinião de especialistas em sistemas de engenharia como dutos flexíveis submarinos. A flexibilidade na escolha dos pesos é uma das vantagens apontadas à modelagem por DEA.

O método de determinação dos pesos das não-conformidades de inspeção (ξ_{NCI}) ocorre em duas etapas e necessita da análise dos mecanismos de degradação do duto flexível apresentados nos anexos [1] e [2].

1ª Etapa) *Números são alocados para indicar as não-conformidades observáveis em inspeção em função da proximidade dessas aos modos de falha final, seguindo os mecanismos de dutos flexíveis apresentados. Em alguns casos, para a mesma não-conformidade foram adotados pesos diferentes para diferenciar o grau de degradação (por exemplo, corrosão leve, moderada ou alta).*

2ª Etapa) *Os estágios das não-conformidades em cada mecanismo de falha iniciam-se da esquerda para a direita, onde terminam em cada modo de falha. Porém para demonstração da equação, numera-se as colunas da direita para a esquerda. Os pesos subjetivos das NCIs são calculados em função da posição da não-conformidade e número total de estágios, e seus valores colocados em ordem de decrescente a partir do modo de falha final (equação 9).*

Notações referentes a estrutura dos MCF:

LC – última coluna (à esquerda) do MCF, corresponde ao número total (n) de estágios;

PC – primeira coluna à direita ($PC = 1$) – significa a coluna imediatamente anterior ao estágio final de falha (MF);

Ω – número da coluna que possui a NCI estudada;

ξ_{NCI} – valor numérico do peso subjetivo

Para o cálculo do ξ_{NCI} aplica-se uma interpolação linear, atribuindo os seguintes intervalos de variação numérica para um total de n estágios, como indicado na Figura 22 a seguir:

- Para Coluna : $1 \leq \Omega \leq LC$, onde $PC = 1$ e $LC = (n - 1)$
- Para o Peso : $1 \leq \xi_{NCI} \leq 5$

MECANISMO DE FALHA - Dutos Flexíveis Submarinos				
Estágio 1	Estágio 2	.....	Estágio (n-1)	Estágio (n)
$LC = (n - 1)$ $\xi_{NCI} = 1$	$\Omega = (n - 2)$ ξ_{NCI}$	.....	\Omega = PC = 1$ $\xi_{NCI} = 5$	MODO DE FALHA
NCI Geradora	NCI Intermediária	.....	NCI (+ Crítica)	PERDA DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL

Figura 22: Critério de determinação dos pesos subjetivos via mecanismo de falha.

Obtém-se, desta forma, a equação (32) para o cálculo do peso NCI:

$$\frac{LC - 1}{\Omega - 1} = \frac{1 - 5}{\xi_{NCI} - 5}$$

Ou ainda,

$$\xi_{NCI} = 5 - 4 \cdot \frac{(\Omega - 1)}{(LC - 1)} \quad (32)$$

Onde a última coluna à esquerda tem peso igual a 1 (NCI mais improvável de ocorrer). E a penúltima coluna à direita tem peso igual a 5 (NCI crítica que antecede os modos de falha). A equação (32) deverá ser aplicada para cada coluna do MCF, variando apenas a posição (Ω) nas NCI e conservando o número total de colunas (LC) igual ao número total de estágios menos uma unidade ($n - 1$). Este procedimento exclui o número da coluna dos modos de falhas do cálculo dos pesos, uma vez que o duto nesta posição já atingiu a perda total de integridade.

Utilizando os mecanismos de falhas propostos em anexo, bem como as Tabelas 6 até 9 que relacionam as NCI e dados operacionais, o critério de cálculo do peso subjetivo para algumas NCI ficam portanto :

- **NCI 11 (+crítica)** – Ângulo de catenária inadequado; posição mais próxima do modo de falha – $\Omega = 7$; para riser – LC=9

$$\xi_{NCI(11)+Crítica} = 5 - 4 \cdot \frac{2-1}{9-1} = 5 - 0,5 = 4,5$$

- **NCI 3 (+crítica)** – Dano superficial da capa externa; posição mais próxima do modo de falha – $\Omega = 4$; para riser – LC=9

$$\xi_{NCI(3)+Crítica} = 5 - 4 \cdot \frac{4-1}{9-1} = 5 - 1,5 = 3,5$$

- **NCI 9 (+crítica)** – Curvatura excessiva do duto; posição mais próxima do modo de falha – $\Omega = 3$; para flowline – LC=7

$$\xi_{NCI(9)+Crítica} = 5 - 4 \cdot \frac{2-1}{7-1} = 5 - 4 \cdot \frac{1}{6} = 4,4$$

Uma mesma não-conformidade observável pode apresentar vários pesos subjetivos, uma vez que pode estar localizada em estágios diferentes de outros mecanismos de falhas. É o caso, por exemplo, da *NCI 1* “Dano localizada da capa externa”, que ocupa colunas distintas em todos os mecanismos de falhas, exceto no *MCF* da Colapso da Carcaça .Ver mecanismos em anexo [1] e [2].

$$\xi_{NCI(1)RISER} = \begin{cases} 2,0, (\Omega = 7) \\ 2,5, (\Omega = 6) \\ 3,0, (\Omega = 5) \\ 3,5, (\Omega = 4) \\ 4,0, (\Omega = 3) \therefore (+crítica) \end{cases}$$

Verifica-se portanto, que a *NCI 1* será mais crítica quando possuir peso 4, e tiver localização mais próxima do modo de falha total . A Tabela 13 abaixo apresenta, para riser e flowline, todos os resultados do cálculo dos pesos subjetivos para cada uma das não-conformidades mais críticas, ou seja, aquelas que estiverem mais próximas dos modos de falhas. Para o ranqueamento de risco em DEA, esses valores serão

considerados para compor a matriz de dados de entrada do modelo. Os resultados estão reunidos na tabela a seguir:

Tabela 13: Pesos Subjetivos das Não-conformidades de Inspeção (NCI) do Modelo DEA Risco.

Código NCI	PESO SUBJETIVO (NCI+ crítica) RISER	PESO SUBJETIVO (NCI+ crítica) FLOWLINE	Código NCI	PESO SUBJETIVO (NCI+ crítica) RISER	PESO SUBJETIVO (NCI+ crítica) FLOWLINE
NCI 1	4	3,7	NCI 19	4	não presente
NCI 2	5	5	NCI 20	3,5	não presente
NCI 3	3,5	3	NCI 21	1,5	não presente
NCI 4	5	<i>não presente</i>	NCI 22 L	4	3,7
NCI 5	5	5	NCI 22 M	4,5	4,4
NCI 6	<i>não presente</i>	3,7	NCI 22 A	5	5
NCI 7	5	5	NCI 23 L	3,5	não presente
NCI 8	5	5	NCI 23 M	4	<i>não presente</i>
NCI 9	4,5	4,4	NCI 23 A	4,5	<i>não presente</i>
NCI 10	3	<i>não presente</i>	NCI 24 L	4	3,7
NCI 11	4,5	<i>não presente</i>	NCI 24 M	4,5	4,4
NCI 12	1	<i>não presente</i>	NCI 24 A	5	5
NCI 13	5	5	NCI 25	4,5	4,4
NCI 14	3	2,4	NCI 26	5	5
NCI 15	5	5	NCI 27	4,5	4,4
NCI 16	não presente	3,7	NCI 28	5	5
NCI 17	3,5	não presente			
NCI 18	4,5	não presente	NCI 29	4	3,7

6.4.2 – Cálculo do Peso Subjetivo do Dado Operacional (Riser/Flowline)

Como foi apresentado, o modelo DEA Risco está considerando os dados de operação potencializador (DO_{pot}) de não conformidades de inspeção . Os DO_{pot} serão tratados como não-conformidades de inspeção potencializadoras de não-conformidades críticas.

Para o cálculo do peso operacional potencializador , será utilizado a equação (32). a partir da consulta realizada aos mecanismos de falha (MCF) com o seguinte critério adotado :

1° passo) - Identificar os conjuntos de NCI precipitadas por cada um dos (DO_{pot}). Ver Tabelas 6 até 9.

2° passo) Identificar na planilha de MCF a posição da coluna ($\Omega_{NCI+crítica(PRECIPITADA)}$) da não conformidade mais crítica precipitada;

3° passo) – A posição do (DO_{pot}) será dado por : $\Omega_{DO(pot)} = \Omega_{NCI(critica)} + 1$.

Assim sendo,

$$\xi_{DO(pot)} = 5 - 4 \cdot \frac{(\Omega_{DO(pot)} - 1)}{(LC - 1)} \quad (33)$$

Onde:

$\Omega_{DO(pot)}$ = número da coluna do dado operacional potencializador

$\Omega_{NCI(critica)}$ = número da coluna da não-conformidade de inspeção precipitada e mais próxima do modo de falha.

De uma forma mais simplificada, para riser flexível pode-se facilmente demonstrar que a partir dos MCFs em anexos, e considerando LC=9, tem-se :

$$\xi_{DO(pot)RISER} = 5 - 0,5 \cdot \Omega_{NCI(+critica)PRECIPITADA} \quad (34)$$

Esta equação garante que o peso do dado operacional potencializador não tenha um valor superior ou igual ao valor ao peso da não-conformidade que ele precipita, evitando

contradições. Neste momento o dado operacional é colocado em uma coluna anterior (à esquerda) da posição $\Omega_{NCI+crítica(PRECIPITADA)}$.

Utilizando os mecanismos de falhas (MCF) em anexo [1] e [2], o critério de cálculo do peso subjetivo de alguns dados operacionais potencializadores deverá seguir algumas considerações importantes para o caso de precipitar simultaneamente mais de uma *NCI* crítica, ou precipitar danos numa mesma camada em estágios diferentes.

Fazendo uso dos MCF e das Tabelas 1 até 4 que relacionam as *NCI* com o tipo de aplicação (riser/flowline), e das Tabelas 6 até 9, que apresentam e relacionam o $DO_{(pot)}$ e o tipo de aplicação da linha flexível, respectivamente, é possível encontrar todos os pesos de cada $DO_{(pot)}$.

Como exemplo, será usado o dado operacional potencializador DO1 - “Profundidade Alta” e suas *NCI* críticas precipitadas: Kink (curvatura excessiva localizada) (*NCI* 8), Curvatura excessiva (*NCI* 9), ângulo de catenária inadequado (*NCI* 11) e torção excessiva (*NCI* 5). Aplicando a equação (34), obtêm-se os pesos subjetivos abaixo:

$$\xi_{DO1(pot)} = \begin{cases} 5 - 0,5 \cdot \Omega_{NCI8(+crítica)} = 5 - 0,5 \cdot 1 = 4,5 \\ 5 - 0,5 \cdot \Omega_{NCI9(+crítica)} = 5 - 0,5 \cdot 2 = 4,0 \\ 5 - 0,5 \cdot \Omega_{NCI11(+crítica)} = 5 - 0,5 \cdot 2 = 4,0 \\ 5 - 0,5 \cdot \Omega_{NCI5(+crítica)} = 5 - 0,5 \cdot 1 = 4,5 \end{cases}$$

Verifica-se que para as *NCI* 8 e *NCI* 5, o dado operacional é mais potencializador do que para as *NCI*s 9 e 11. Desta forma, será considerado o maior peso subjetivo (4,5) do dado operacional precipitador, a fim de calcular o risco potencial de falha do duto flexível. A Tabela 14 reúne todos os valores obtidos para os pesos subjetivos dos $DO_{(pot)}$ para risers e flowlines. Esses pesos servirão para compor o estudo de caso do modelo DEA.

Para o caso do $DO_{(pot)}$ precipitar *NCI*s diferentes em uma mesma camada, deverá ser observado que *NCI* primeiro é potencializada. No caso da capa externa de risers e flowlines, o dado operacional $DO_{(pot)}$ 6 - “Solo Marinho Abrasivo”, vai potencializar primeiro o dano superficial (desgaste) do polímero (*NCI* 3), para depois acelerar o processo de degradação dos danos localizados (fissura, trinca) (*NCI* 1) ou generalizados

(ruptura) (*NCI 2*). Neste caso, considera-se o menor peso (3,0) para o $DO_{(pot)}$, devido a prioridade de potencialização.

$$\xi_{DO6(pot)} = \begin{cases} 5 - 0,5 \cdot \Omega_{NCI1(+crítica)} = 5 - 0,5 \cdot 3 = 3,5 \\ 5 - 0,5 \cdot \Omega_{NCI2(+crítica)} = 5 - 0,5 \cdot 1 = 4,5 \\ 5 - 0,5 \cdot \Omega_{NCI3(+crítica)} = 5 - 0,5 \cdot 4 = 3,0 \end{cases}$$

Algo semelhante ocorre com a barreira de vedação, onde o $DO_{(pot)}$ - Temperatura Alta precipita trincas localizadas (*NCI 25*) e generalizadas (*NCI 26*), além de fissuras (*NCI 28*) em estágios distintos. Neste caso verifica-se a ordem de precipitação. Prevalendo o menor peso (4,0), pois danos localizados são priorizados no processo de degradação.

$$\xi_{DO2(pot)} = \begin{cases} 5 - 0,5 \Omega_{NCI25(+crítica)} = 5 - 0,5 \cdot 2 = 4,0 \\ 5 - 0,5 \Omega_{NCI26(+crítica)} = 5 - 0,5 \cdot 1 = 4,5 \\ 5 - 0,5 \Omega_{NCI28(+crítica)} = 5 - 0,5 \cdot 1 = 4,5 \end{cases}$$

Analisando os pesos subjetivos dos DO8 –“Cargas Ambientais Excessivas”, obtém-se:

$$\xi_{DO8(pot)} = \begin{cases} 5 - 0,5 \Omega_{NCI5(+crítica)} = 5 - 0,5 \cdot 1 = 4,5, idem(NCI4, NCI8, NCI13) \\ 5 - 0,5 \Omega_{NCI9(+crítica)} = 5 - 0,5 \cdot 2 = 4,0, idem(NCI11, NCI18) \\ 5 - 0,5 \Omega_{NCI19(+crítica)} = 5 - 0,5 \cdot 3 = 3,5, idem(NCI29) \\ 5 - 0,5 \Omega_{NCI17(+crítica)} = 5 - 0,5 \cdot 4 = 3,0 \end{cases}$$

Neste caso, prevalece o maior peso subjetivo (4,5) para o DO8. Verifica-se que o carregamento ambiental em condições extremas e agressivas, potencializa diversas *NCIs* como: kink (*NCI 8*), torção excessiva (*NCI 5*), perda de flutuadores (*NCI 17*), ruptura (*NCI 19*) e desprendimento (*NCI 18*) do bending stiffener, destravamento localizado da armadura de pressão (zeta) (*NCI 29*), ruptura localizada de arames da armadura de tração (*NCI 4*) e gaiola de passarinho (*NCI 13*).

Após a identificação dos mecanismos de degradação, foram aplicadas as equações 32 e 33 a fim de calcular os pesos subjetivos das não-conformidades de inspeção e dados de operação. Observa-se que para uma mesma não-conformidade foi identificado vários

tipos de pesos, sendo incluído no modelo somente o maior valor de peso (*NCI* mais crítica).

Tabela 14: Pesos Subjetivos dos Dados Operacionais – Output do Modelo DEA Risco.

Código Dado Operacional (DO)	Peso do DO (RISER)	Peso do DO (FLOWLINE)
	$\xi_{DO(por)} = 5 - 4 \cdot \frac{\Omega - 1}{LC - 1}$	
DO1	4,5	4,4
DO2	4	4,4
DO3	4,5	4,4
*DO4	4	3,7
DO5	4,5	4,4
**DO6	3	2,4
**DO7	3	2,4
DO8	4,5	4,4

(*) Prevaleceu o menor peso por ordem de ocorrência da *NCI* (o dano localizado na barreira de vedação é precipitado por pressão alta primeiro).

(**) Prevaleceu o menor peso por ordem de ocorrência da *NCI* : dano superficial da capa externa é precipitado (por Solo Marinho abrasivo ou Duto em Trincheira) primeiro do que danos localizados ou generalizados.

6.4.3 – Dados de Entrada do Estudo de Caso (seleção de variáveis DEA) – Riser/Flowline

A escolha das variáveis de entrada do modelo DEA corresponde um dos principais momentos da modelagem (MEZA, 1998). A escolha certa das variáveis que descrevam o comportamento estrutural de dutos flexíveis é fundamental para que a modelagem do risco tenha resultados de acordo com a realidade dos mecanismos de falhas.

Assim, é recomendável evitar os MF_s que apresentem: os mesmos valores de pesos subjetivos; mais de dois valores numéricos diferentes; correlação direta, ou seja, dependentes entre si; baixos pesos subjetivos.

A decisão em escolher os modos de falhas como variáveis de entrada associadas as $NCI_{críticas}$ ou $DOs(pot)$ foi motivada a partir dos mecanismos de degradação propostos nesta dissertação (Anexo 1 e 2).

A seleção dos modos de falhas como variáveis de entrada do modelo DEA, evita resultados tendenciosos no ranqueamento de risco, uma vez que cada MF representa diferentes mecanismos de perda de integridade.

Cada MF será representado por um grupo de $NCI_{críticas}$ ou $DO(pot)$ retirados do mesmo MCF , ou de MCF_s distintos que ocasionem o MF em questão. Significa que as $NCI_{críticas}$ escolhidas poderão provocar MF_s iguais, porém em mecanismos MCF_s diferentes.

O critério de seleção de $NCIs$ críticas para o estudo de caso de risers flexíveis foi motivado por sua proximidade ao modo de falha (estágio de perda de integridade), e o número de estágios em mecanismos de falhas de curta, média ou longa duração. Foram escolhidas $NCI_{críticas}$ de 1° e último estágios nos MCF_s mais curtos e longos de cada categoria de modo de falha. A escolha de $NCI_{críticas}$ em estágios intermediários ficou restrita a MCF_s de longa duração.

Os estágios iniciais oferecem menos risco ao duto, pois possuem menores pesos subjetivos e estão mais afastados dos modos de falhas. Enquanto que estágios críticos estão mais próximos ao modo de falha, ocasionam rápida perda de integridade e apresentam pesos mais elevados. Vale lembrar que, o número de estágios é diretamente proporcional ao tempo de duração para o duto atingir o modo de falha final.

Para contribuir na maximização do risco, foi escolhido um número maior de $NCI_{críticas}$ em estágios próximos aos modos de falhas. Para facilitar os ranqueamentos de dutos flexíveis críticos e não-críticos, foi utilizado MCF_s de diferentes intervalos de tempo de duração. Procurou-se evitar a escolha de mais de três $NCI_{críticas}$ sucessivas ou pertencentes ao mesmo MCF , permitindo uma explicação de resultados mais abrangente e menos tendenciosa.

As Tabelas 15 e 16 a seguir indicam as variáveis DEA do modelo risco relativo de dutos flexíveis de aplicação dinâmica.

Tabela 15: Tabela de seleção de variáveis DEA (Riser Flexível) – Primeira parte

Variáveis DEA (j) de entrada do modelo Risco (Riser)			
Unidade DEA	Modo de Falha – MF2 (j = 1)	Modo de Falha – MF4 (j = 2)	Modo de Falha – MF3 (j = 3)
Duto Flexível (riser)	Ruptura Generalizada de arames da armadura de tração	Perda de Estanqueidade do Conector	Destravamento (ou ruptura) da armadura de pressão (zeta)
DUTO k = 1, ..., 15 Input DEA Unitário i = 1	NCI 3: Dano superficial na capa externa ($\xi = 3,5$)	NCI 12: Falha na válvula de alívio do end fitting (bloqueio ou vazamento) ($\xi = 1,0$)	NCI 14: Interferência entre Dutos ($\xi = 3,0$)
	NCI 11: Ângulo de catenária inadequado ($\xi = 4,5$)	NCI 19: Ruptura do bending stiffener ($\xi = 4,0$)	NCI 24 L : Corrosão leve da Armadura de Pressão ($\xi = 4,0$)
	NCI 9 : Curvatura excessiva ($\xi = 4,5$)	NCI 18: Desprendimento do bending stiffener ($\xi = 4,5$)	DO_(pot) 3 : Baixa Pressão de Operação ($\xi = 4,5$)
	NCI 4: Torção excessiva ($\xi = 5,0$)	NCI 2: Ruptura localizada de arames armadura tração no conector ($\xi = 5,0$)	NCI 2: Gaiola de passarinho ($\xi = 5,0$)
	ausente (0,5)	ausente (0,5)	ausente (0,5)

Tabela 16: Tabela de seleção de variáveis DEA (Riser Flexível) – Segunda parte

Variáveis DEA (j) de entrada do modelo Risco (Riser)			
Unidade DEA	Modo de Falha – MF1 (j = 4)	Modo de Falha – MF6 (j = 5)	Modo de Falha – MF7 (j = 6)
Duto Flexível (riser)	Falha da Carcaça interna (colapso ou destravamento)	Entupimento do duto	Ruptura da Barreira de Vedação
DUTO k = 1, ..., 15 Input DEA Unitário i = 1	DO_(pot) 7 : Duto em Trincheira ($\xi = 3,0$)	DO_(pot) 6 : Solo Marinho Abrasivo ($\xi = 3,0$)	DO_(pot) 2 : Temperatura Alta ($\xi = 4,0$)
	NCI 22 L : Corrosão leve da Carcaça Interna ($\xi = 4,0$)	NCI 17 : Perda de flutuadores ($\xi = 3,5$)	DO_(pot) 4 : Pressão Alta de Operação ($\xi = 4,0$)
	NCI 9 : Curvatura excessiva ($\xi = 4,5$)	NCI 1: Dano Generalizado na capa externa ($\xi = 5,0$)	NCI 27 : Extrusão da Barreira de Vedação ($\xi = 4,5$)
	NCI 7: Ovalização Excessiva ($\xi = 5$)	NCI 15: Espaço Anular com presença de agentes corrosivos (H ₂ S, CO ₂) ($\xi = 5,0$)	NCI 26 : Trinca generalizada na Barreira de Vedação ($\xi = 5,0$)
	ausente (0,5)	ausente (0,5)	ausente (0,5)

Cabe ressaltar que, um *MCF* de muitos estágios, está geralmente associado a fenômenos de rompimento de capa externa e corrosão das camadas metálicas. Os

mecanismos de médio tempo de duração estão relacionados à falhas no conector ou dispositivos auxiliares. Enquanto que MCF de imediata perda de integridade, estão associados a $NCI_{críticas}$ acidentais ou desprendimento súbito de bending stiffener, acarretando kink do duto e possível rompimento dos arames da armadura de tração.

A escolha de diferentes não-conformidades permite maior distribuição de valores de pesos de entrada. Em DEA, para obter ranqueamentos de risco com maior poder discriminatório entre dutos flexíveis mais e menos críticos, é aconselhável evitar pesos subjetivos de valores numéricos repetidos, nulos, negativos ou muito afastados entre si. Neste caso, está sendo considerado como faixa de variação do peso o intervalo de 1 (peso mínimo) a 5 (peso máximo). Para dutos não defeituosos, a ausência da $NCI_{crítica}$ que indique a proximidade ao modo de falha em questão foi considerado peso subjetivo igual a 0,5.

Vale ressaltar que os pesos subjetivos correspondem aos máximos valores para as $NCI_{críticas}$ determinadas a partir de análise de todos os MCF , independentemente do MF estudado. Após a seleção de variáveis é recomendável justificar as escolhas feitas, para facilitar a análise e aceitação dos resultados obtidos pela modelagem. A análise dos ranqueamentos fica mais rápida e consistente com a justificativa da seleção dos MF_s e $NCI_{críticas}$ associadas.

Para flowlines, a seleção dos modos de falhas como variáveis do modelo DEA risco, seguirá a mesma linha de raciocínio aplicada em risers. As $NCI_{críticas}$ ou DO_{pot} serão retirados dos MCF_s do Anexo 2. Seus pesos subjetivos corresponderão aos dados numéricos atribuídos pelo especialista para cada $NCI_{crítica}$ que represente o modo de falha em questão.

Em flowlines, os mecanismos de danos acidentais e $NCIs$ críticas relacionadas ao DO_{pot} solo marinho abrasivo, são mais evidenciados do que em risers. Isto se deve a danos ocasionados por queda de objetos, contato com regiões de corais, relevo irregular gerando vão livre excessivo, looping do duto, entre outros. No entanto, os MCF_s relacionados a dispositivos auxiliares e danos nas camadas metálicas são significativamente maiores em risers do que em flowlines.

A Tabela 17 a seguir indica as variáveis DEA da modelagem do risco de dutos flexíveis para aplicação estática.

Tabela 17: Tabela de não conformidades de inspeção e parâmetros operacionais para modelagem em DEA (Flowline Flexível).

Variáveis DEA (j) de entrada do modelo Risco (Flowline)				
Unidade DEA	Modo de Falha – MF1 (j = 1)	Modo de Falha – MF3 (j = 2)	Modo de Falha – MF6 (j = 3)	Modo de Falha – MF7 (j = 4)
Duto Flexível (flowline)	Falha da Carcaça Interna (Colapso ou Destravamento)	Destravamento (ou ruptura geral) da Armadura de Pressão (zeta)	Entupimento (ou redução de vazão)	Ruptura da Barreira de Vedação (vazamento)
DUTO	DO_(pot) 6 : Solo Marinho Abrasivo ($\xi = 2,4$)	NCI 14 : Interferência entre dutos (cruzamento) ($\xi = 2,4$)	DO_(pot) 7 : Duto em Trincheira ($\xi = 2,4$)	DO_(pot) 4: Pressão Alta de Operação ($\xi = 3,7$)
k = 1, ..., 15	NCI 3 : Dano superficial da capa externa (abrasão, desgaste, corte) ($\xi = 3,0$)	NCI 16 : Looping do duto ($\xi = 3,7$)	NCI 1 : Dano Localizado na Capa Externa (furo, fissura, trinca) ($\xi = 3,7$)	DO_(pot) 2: Profundidade Alta ($\xi = 4,4$)
Input DEA Unitário	NCI 6 : Vão Livre Excessivo ($\xi = 3,7$)	NCI 24 M: Corrosão moderada da armadura de pressão ($\xi = 4,4$)	DO_(pot) 5 : Presença de agente corrosivo (ou químico) de fluido interno (H ₂ S, CO ₂) ($\xi = 4,4$)	NCI 25 : Trinca Localizada na Barreira de Vedação ($\xi = 4,4$)
i = 1	NCI 8 : Kink (curvatura localizada excessiva) ($\xi = 5,0$)	NCI 7: Ovalização Excessiva ($\xi = 5,0$)	NCI 15: Espaço Anular com presença de agentes corrosivos (H ₂ S, CO ₂) ($\xi = 5,0$)	NCI 28: Fissura (ou furo) da Barreira de Vedação ($\xi = 5,0$)
	<i>ausente (0,5)</i>	<i>ausente (0,5)</i>	<i>ausente (0,5)</i>	<i>ausente (0,5)</i>

Capítulo 7 – Ranqueamento de Risco Relativo para Dutos Flexíveis Submarinos

O modelo DEA Risco proposto no Capítulo 6 permite o ranqueamento de dutos flexíveis baseado na comparação dos fatores de riscos relativos calculados pelo software SIAD (MEZA *et al.*, 2005a). Os dados de entrada do software correspondem aos pesos subjetivos (ξ_{sj}) de cada MF considerado para o estudo de caso (Tabelas 15 até 17). Cada MF apresentou um conjunto de pesos subjetivos de $NCI_{crítica}$ ou $DO_{(pot)}$ calculados pelo especialista a partir dos MCF_s (Anexos 1 e 2). As $NCI_{críticas}$ ou $DO_{(pot)}$ escolhidas para representar os MF_s poderão ser retiradas de MCF_s iguais ou distintos.

Os resultados gerados pelo SIAD (fatores de risco - $R_{Duto(z)}$ e pesos objetivos - φ_{sj}) permitem a obtenção dos ranqueamentos de risco ($DEA/SIAD$) de tal modo que, os dutos mais críticos estarão nas primeiras posições, enquanto que os dutos menos críticos ocuparão as últimas colocações dos ranqueamentos.

Os ranqueamentos $DEA/SIAD$ obtidos neste capítulo são provenientes de modelos propostos para o estudo comparativo com os ranqueamentos obtidos por especialista (Φ_E). Cada modelo proposto corresponde a pequenos estudos de caso envolvendo dois ou mais MF_s . Um dos objetivos dos estudos de casos corresponde à investigação dos modelos DEA Risco sem (ou com) limitações. Serão criados modelos DEA Risco para a correção de limitações presentes na modelagem mediante a aplicação de DEA avançado. O estudo comparativo e a análise de resultados dos ranqueamentos de risco serão justificados por MCF_s .

Para facilitar a interpretação dos resultados dos ranqueamentos de risco $DEA/SIAD$ serão considerados critérios de classificação para os modelos DEA Risco. Outros critérios serão adotados para relacionar dutos flexíveis e MCF_s com os resultados do ranqueamento.

Os critérios adotados na modelagem DEA Risco correspondem a:

Critério 1 - Quanto aos modelos DEA/SIAD para avaliação de Risco serão adotados três tipos de modelos baseados na metodologia DEA:

- **Modelos** Θ - Verificação da recomendação empírica (Equação 35) e aceitável poder discriminatório entre dutos flexíveis.

$$n \circ \text{DutosFlexíveis} \cong 2.(n \circ MF_s + 1) \text{ ou } 3.(n \circ MF_s + 1) \quad (35)$$

- **Modelos** β - Verificação de Limitações DEA e baixa discriminação de dutos flexíveis. Serão comprovados problemas de flexibilidade de pesos e não adoção das recomendações (Equação 35).
- **Modelos** δ - Modelagem de correção das fragilidades DEA e verificação do aumento do poder discriminatório (aumento do número de dutos flexíveis ou aplicação de DEA avançado com restrição ao peso). Proporciona redução do número de dutos sobre a fronteira de alto risco.

Critério 2 - Quanto aos dutos flexíveis

- **Critério (2.1) - Duto mais crítico** → Fator de Risco DEA/SIAD ($R = 1$ ou $R = 100\%$); dutos na primeira posição do ranqueamento; presença normalmente de $NCI_{crítica}$ ou $DO_{(pot)}$ de estágios finais, ou seja, mais próximos do MF_s ; menor tempo para atingir a perda de integridade estrutural; curta duração do MCF (menor número de estágios); dutos sobre a envoltória de alto risco .

- **Critério (2.2) - Duto menos crítico** → Fator de Risco DEA/SIAD ($0 < R < 1$); dutos nas posições finais do ranqueamento; presença normalmente de $NCI_{crítica}$ ou $DO_{(pot)}$ de estágios iniciais, ou seja, mais afastadas do MF_s ; maior tempo para atingir a perda total de integridade estrutural; longa duração do MCF (maior número de estágios); dutos fora da envoltória de alto risco (interior da fronteira) .

Critério 3 – Quanto a classificação dos Mecanismos de Falhas (MCF)

Com base nos MCF_s em Anexo 1 e 2, verificam-se três tipos de Mecanismos de Falhas (MCF_s). O primeiro tipo de MCF apresenta maior número de estágios e estão associados a abrasão (ou rompimento superficial) da capa externa e a corrosão das camadas metálicas. O segundo tipo de MCF ocorre em médio tempo de duração, e estão associados a falhas no conector (end fitting) ou dispositivos auxiliares (bend stiffener, flutuadores, etc). Sendo observados em dutos com posições intermediárias nos ranqueamentos de risco. O terceiro MCF apresenta poucos estágios, e geralmente estão relacionados a $NCI_{críticas}$ acidentais ou desprendimento de bending stiffener, kink do duto, ovalização (ou torção) excessiva e rompimento de arames da armadura de tração. Estes últimos MCF_s acarretam perda imediata de integridade estrutural do duto.

Cabe ressaltar que o software SIAD implementa os modelos DEA clássico (CCR) e avançados, resolvendo-se os PPLs da modelagem para cada duto através do Algoritmo Simplex (modelo dos multiplicadores) (Anexos 3 e 4). Os modelos DEA avançados poderão ser aplicados para a correção de limitações ou distorções da modelagem.

Na seção 7.1 ocorrerá a apresentação dos ranqueamentos (DEA/SIAD), algumas envoltórias de risco máximo, bem como o estudo comparativo entre os ranqueamentos de fatores de risco ($R_{Duto(z)}$), além da apresentação dos métodos de ranqueamentos sugeridos pelo especialista.

7.1 - Ranqueamento DEA/SIAD e Envoltória Bidimensional de Alto Risco – Riser

7.1.1 – Modelo Θ_1 R1- Ranking DEA/SIAD na Envoltória 1 (Riser): Ruptura Generalizada de Arames da Armadura de Tração (MF2) x Perda de Estanqueidade do Conector (MF4)

A Tabela 18 a seguir mostra o ranqueamento de risco relativo, os pesos subjetivos adotados pelo especialista (ξ_{zj}), os pesos objetivos (φ_{zj}), fatores de risco calculados pelo

SIAD para cada riser do modelo $\Theta_1 R1$ e as condições de modelagem para modelos DEA com input unitário.

Tabela 18: Matriz de Pesos (Especialista e DEA) e Ranking DEA/SIAD – Rodada (R1)

Duto Riser Flexível (z)	Input $i = 1$		MF 2 $j = 1$		MF 4 $j = 2$		Fator de Risco Relativo SIAD $R_{Duto(z)} (\%)$	Ranking DEA/SIAD ($\Theta_1 R1$)
	α_{iz}	μ_{iz}	ξ_{zj}	φ_{zj}	ξ_{zj}	φ_{zj}		
D1	1	1	5	0,20	1	0,00	1,0 = (100%)	1
D2	1	1	0,5	0,00	5	0,20	1,0 = (100%)	1
D3	1	1	4,5	0,19	4,5	0,02	1,0 = (100%)	1
D4	1	1	4,5	0,2	0,5	0,00	0,90 = (90%)	2
D5	1	1	3,5	0,2	1	0,03	0,70 = (70%)	5
D6	1	1	0,5	0,03	4	0,24	0,80 = (80%)	4
D7	1	1	3,5	0,02	4	0,22	0,87 = (87%)	3

De acordo com a análise da Tabela 18, os dutos que seguem o Critério 2.1 correspondem aos de números D1, D2 e D3. Estes dutos são os mais críticos por apresentarem curtos MCF_s (Critério 3) e presença sobre a fronteira de alto risco (Figura 25). Observa-se que a presença de ruptura localizada de arames na armadura de tração no conector ($\xi_{22} = 5$) faz com que o duto D2 seja crítico, mesmo na ausência de $NCI_{crítica}$ no MF2. Isto pode ser explicado pelo fato desta $NCI_{crítica}$ do MF4 corresponder a estágios que antecedem o MF2. O duto D3 é crítico por combinar ângulo de catenária inadequado ($\xi_{31} = 4,5$) e desprendimento de bending stiffener ($\xi_{32} = 4,5$). Estas são $NCI_{críticas}$ que geram curvatura excessiva no duto em ambos MF_s .

O duto menos crítico corresponde ao D5, uma vez que segue o Critério 2.2. O D5 está fora da envoltória de alto risco por combinar dano superficial de capa externa e falha na válvula de alívio do end fitting (bloqueio ou vazamento). As quais correspondem $NCI_{críticas}$ de estágios iniciais dos MCF . A partir da Tabela 18 e das equações de maximização de risco DEA (Capítulo 6) é possível compreender a obtenção do risco

relativo para qualquer duto. Assim, para os dutos D1 e D4, os fatores de risco correspondem as equações (36) e (37):

$$\blacktriangleright R_{DUTO(1)} = \xi_{11}\varphi_{11} + \xi_{21}\varphi_{21} = 5 \times 0,2 + 1 \times 0 = 1 = 100\% \quad (36)$$

$$\blacktriangleright R_{DUTO(4)} = \xi_{14}\varphi_{14} + \xi_{24}\varphi_{24} = 4,5 \times 0,2 + 0,5 \times 0 = 0,9 = 90\% \quad (37)$$

A Figura 23 refere-se a fronteira de alto risco para os modos de falhas *MF2* e *MF4*. A análise revela que os dutos flexíveis D4, D5, D6 e D7 estão fora da fronteira de risco por seguir o critério 2.2. Vale ressaltar que o risco de atingir a fronteira pode ser medido em função da distância radial dos dutos menos críticos e a envoltória. A seta no gráfico acima indica que o duto D6 apresenta 80% de risco relativo, faltando 20% da distância radial em relação à origem, para chegar ao risco relativo máximo.

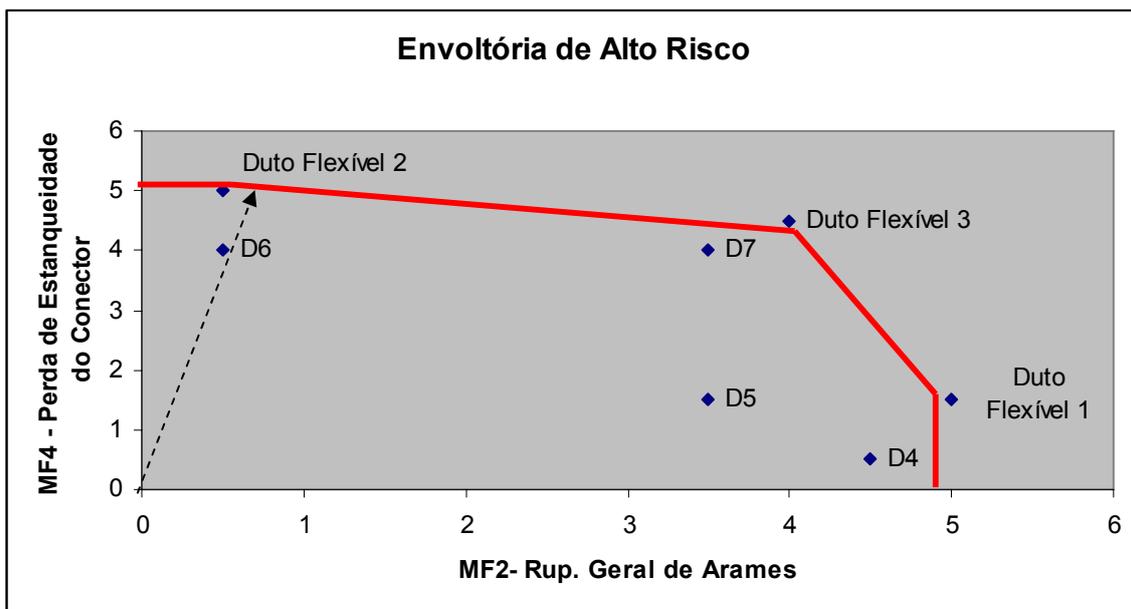


Figura 23 : Fronteira de alto risco de dutos flexíveis (risers) : *MF 2* x *MF 4*

7.1.2 – Modelo Θ_2 R2 - Ranking DEA/SIAD na Envoltória 2 (Riser) : *Destravamento (ou ruptura) da armadura de pressão (zeta) (MF3)* x *Entupimento do duto (MF6)*

O modelo Θ_2 R2 segue o Critério 1, e apresenta ótimo poder discriminatório no ranqueamento de risco para dutos flexíveis. A Tabela 19 revela que os dutos mais críticos

(Critérios 2.1 e 3) são D4, D5 e D7. Enquanto que os dutos D1 e D6 são os menos críticos (Critérios 2.2 e 3).

Tabela 19: Matriz de Pesos (Especialista e DEA) e Ranking DEA/SIAD – Rodada (R2).

Duto Riser Flexível (z)	Input (i = 1)		MF 3 (j = 1)		MF 6 (j = 2)		Fator de Risco $R_{Duto(z)}$ (%)	Ranking DEA/SIAD ($\Theta_2 R2$)
	α_{iz}	μ_{iz}	ξ_{zj}	φ_{zj}	ξ_{zj}	φ_{zj}		
D1	1	1	3	0,25	3	0,08	0,64=64%	6
D2	1	1	4	0,9	3,5	0,06	0,83=83%	3
D3	1	1	0,5	0,0	3,5	0,28	0,7=70%	5
D4	1	1	4,5	0,0	5	0,2	1=100%	1
D5	1	1	5	0,2	3,5	0,0	1=100%	1
D6	1	1	3	0,33	0,5	0,0	0,6=60%	7
D7	1	1	0,5	0,0	5	0,2	1=100%	1
D8	1	1	4	0,2	3	0,06	0,81=81%	4
D9	1	1	4,5	0,22	3	0,0	0,9=90%	2

O modelo DEA $\Theta_2 R2$ atribui risco máximo aos dutos D4 e D7, porém é interessante ressaltar que o duto D4 é mais crítico por combinar baixa pressão de operação e espaço anular com presença de agentes corrosivos (CO_2 ou H_2S) (ou dano generalizado na capa externa). Enquanto que o D7 possui apenas dano generalizado de capa externa gerando o modo de falha *MF6* (entupimento do duto).

Dentre os dutos menos críticos destacam-se D1 e D6 por possuírem $NCI_{críticas}$ iniciais de MCF_s , gerando longo tempo de duração para atingir os modos de falhas *MF3* e *MF6*. O D1 apresenta interferência com outro duto e o DO_{pot} solo marinho abrasivo. Enquanto que o D6 possui apenas interferência com outra linha flexível iniciando o mecanismo de falha do destravamento (ou ruptura) da armadura de pressão (zeta).

A Figura 24 mostra a fronteira de alto risco do modelo $\Theta_2 R2$. Observa-se que os dutos mais críticos (D4, D5 e D7) estão sobre a fronteira de risco, enquanto que os demais dutos ficaram fora da fronteira por seguirem o Critério 2.2.

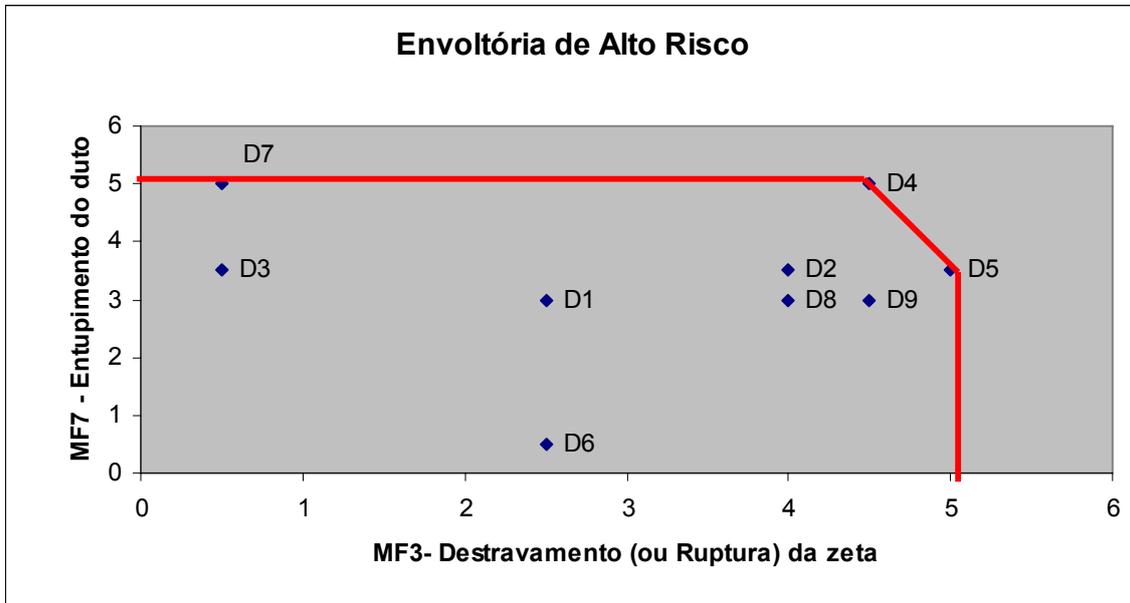


Figura 24 : Fronteira de alto risco de dutos flexíveis (risers) : MF3 x MF7

7.1.3 – Modelo β_1 - Ranking DEA/SIAD (Riser) : Falha da Carcaça Interna (colapso ou destravamento) (MF1) x Entupimento do duto (MF6) x Ruptura da Barreira de Vedação (MF7)

Neste momento é interessante analisar as limitações DEA no modelo proposto para avaliação de risco. De acordo com o Critério 1, o modelo β não segue a recomendação empírica de relação entre o número de dutos e MF_s (Equação 35). Esta fragilidade provoca baixa discriminação entre dutos críticos e não-críticos.

O ranqueamento obtido pelo modelo $\beta_1 R3$ (Tabela 20) revela o excesso de dutos sobre a envoltória de risco. Isto se deve a três fatores: aumento do número de modos de falhas, redução da quantidade de dutos flexíveis, além do problema da flexibilidade na escolha de pesos observada em alguns dutos (D1 e D5).

Tabela 20: Matriz de Pesos (Especialista e DEA) e Ranking de Risco DEA/SIAD – Limitação (baixo poder discriminatório) - Rodada (R3).

Duto Riser Flexível (z)	Input (i = 1)		MF 1 (j = 1)		MF 6 (j = 2)		MF 7 (j = 3)		Risco $R_{Duto(z)}$ (%)	Ranking DEA/SIAD ($\beta_1 R3$)
	α_{iz}	μ_{iz}	ξ_{zj}	φ_{zj}	ξ_{zj}	φ_{zj}	ξ_{zj}	φ_{zj}		
D1	1	1	5	0,2	0,5	0	4,5	0	1=100%	1
D2	1	1	4	0,2	3,5	0,02	0,5	0	0,8=80%	2
D3	1	1	4,5	0	5	0,2	4	0	1=100%	1
D4	1	1	4,5	0	3	0	5	0,2	1=100%	1
D5	1	1	0,5	0	5	0,2	0,5	0	1=100%	1
D6	1	1	5	0,2	0,5	0	4	0	1=100%	1
D7	1	1	3	0	3	0	5	0,2	1=100%	1

A Tabela 20 revela que a DEA atribui risco máximo ($R = 1$) aos dutos com $NCI_{críticas}$ de peso 5, e pesos nulos a todas as outras $NCI_{críticas}$ de pesos distintos de 5. Esta visão rigorosa atribuída pela modelo DEA Risco não identifica os dutos realmente críticos, pois desconsidera as $NCI_{críticas}$ importantes na maximização do risco relativo. Isto significa que o duto D5 é considerado crítico devido somente a presença de rompimento generalizado da capa externa ($\xi_{52} = 5$) no MF6. Enquanto que na avaliação de risco máximo do duto D3 são desconsideradas $NCI_{críticas}$ importantes como: curvatura excessiva ($\xi_{31} = 4,5$) e alta pressão de operação ($\xi_{33} = 4$).

Mesmo que seja aumentado o número de dutos no modelo anterior $\beta_1 R3$, o mesmo problema da baixa discriminação de dutos continuará. O ranqueamento $\beta_2 R4$ (Tabela 21) a seguir, obedece a recomendação empírica (Critério 1), porém o problema da flexibilidade dos pesos das $NCI_{críticas}$ para cada MF acarreta muitos dutos sobre a fronteira de risco. Todos os dutos que tiverem peso máximo (5), mesmo que não tenham outras $NCI_{críticas}$ serão considerados críticos. Desta forma, os dutos menos críticos não foram adequadamente identificados.

Tabela 21: Matriz de Pesos (Especialista e DEA) e Ranking DEA/SIAD – Rodada (R4) – Verificação de limitações.

Duto Riser Flexível (z)	Input (i = 1)		MF 1 (j = 1)		MF 6 (j = 2)		MF 7 (j = 3)		Risco (β_2 R4) $R_{Duto(z)}$ (%)	Ranking DEA/SIA D (β_2 R4)
	α_{iz}	μ_{iz}	ξ_{zj}	φ_{zj}	ξ_{zj}	φ_{zj}	ξ_{zj}	φ_{zj}		
D1	1	1	5	0,2	0,5	0,0	4,5	0,0	100%	1
D2	1	1	4	0,2	3,5	0,05	0,5	0,0	84%	3
D3	1	1	4,5	0,0	5	0,2	4	0,0	100%	1
D4	1	1	4,5	0,0	3	0,0	5	0,2	100%	1
D5	1	1	0,5	0,0	5	0,2	0,5	0,0	100%	1
D6	1	1	5	0,2	0,5	0,0	4	0,0	100%	1
D7	1	1	3	0	3	0,0	5	0,2	100%	1
D8	1	1	5	0,2	3	0,0	4	0,0	100%	1
D9	1	1	4,5	0,0	5	0,2	4,5	0,0	100%	1
D10	1	1	3	0,0	0,5	0,0	5	0,2	100%	1
D11	1	1	3	0,0	3,5	0,28	0,5	0,0	70%	4
D12	1	1	0,5	0,14	3	0,01	4,5	0,07	91%	2

7.1.4 – Modelo β - Ranking DEA/SIAD (Riser) : Ruptura Generalizada de Arames da Armadura de Tração (MF2) x Perda de Estanqueidade do conector (MF4) x Ruptura da Barreira de Vedação (MF7) x Falha da Carcaça Interna (colapso ou destravamento) (MF1) x Entupimento do duto (MF6)

A fim de constatar a ausência e o aumento excessivo de dutos flexíveis sobre a fronteira de risco, neste momento não será considerado a recomendação (Equação 35). Ocorrerá um aumento de modos de falhas, conservando constante o número de dutos baseado no Critério 1 (verificação de limitações DEA).

No modelo β_3 R5 proposto abaixo, foi considerado dois MF_s (MF2 X MF4). Em cada modelo posterior foi acrescentado um MF distinto aos MF_s já existentes em cada

modelo anterior. De tal modo que o modelo β_6 R8 fosse rodado com cinco MF_s (MF2 X MF4 X MF7 X MF1 X MF6). Os dados de entrada de cada rodada encontram-se na Tabela 22 a seguir.

Tabela 22: Matriz de Pesos Subjetivos do Especialista e Ranking DEA/SIAD – Verificação de Limitação - Rodadas (R5, R6, R7 e R8).

Duto Flexível (riser) (z)	Input i = 1	Variável DEA MF 2 j = 1	Variável DEA MF 4 j = 2	Variável DEA MF 7 j = 3	Variável DEA MF 1 j = 4	Variável DEA MF 6 j = 5
D1	1	5	1	4,5	3	3
D2	1	0,5	5	0,5	4	3,5
D3	1	4,5	4,5	4	4,5	5
D4	1	4,5	0,5	5	5	5
D5	1	3,5	1	0,5	0,5	0,5
D6	1	0,5	4	4	0,5	3
D7	1	3,5	4	5	5	3,5
D8	1	4,5	1	4	4,5	5
D9	1	4,5	4	4,5	4	5
D10	1	3,5	4,5	5	3	0,5
D11	1	5	5	0,5	3	5
D12	1	0,5	4,5	4	4,5	0,5
D13	1	4,5	1	4	4	3
D14	1	4,5	4,5	4,5	3	3,5
D15	1	4,5	0,5	0,5	0,5	3

Considerando um aumento no número de dutos flexíveis, e conservando dois MF_s , deverá ocasionar excesso de dutos flexíveis fora da fronteira de risco. Enquanto que o aumento de MF_s , mantendo constante o número de dutos, tornará excessivo sua presença sobre a fronteira de risco (Tabela 23) .

Tabela 23: Ranking DEA/SIAD e Fatores de Risco (alta e baixa discriminação – Rodadas R5, R6, R7 e R8).

Duto Flexível (riser) (z)	Risco $R_{Duto(z)}$ (%) Rodada ($\beta_3 R5$)	Risco $R_{Duto(z)}$ (%) Rodada ($\beta_4 R6$)	Risco $R_{Duto(z)}$ (%) Rodada ($\beta_5 R7$)	Risco $R_{Duto(z)}$ (%) Rodada ($\beta_6 R8$)	RANK DEA SIAD ($\beta_3 R5$)	RANK DEA SIAD ($\beta_4 R6$)	RANK DEA SIAD ($\beta_5 R7$)	RANK DEA SIAD ($\beta_6 R8$)
D1	100%	100%	100%	100%	1	1	1	1
D2	100%	100%	100%	100%	1	1	1	1
D3	90%	98%	100%	100%	2	3	1	1
D4	90%	100%	100%	100%	2	1	1	1
D5	70%	70%	70%	70%	4	7	6	5
D6	80%	87%	87%	88%	3	6	5	4
D7	80%	100%	100%	100%	3	1	1	1
D8	90%	90%	97%	100%	2	5	2	1
D9	90%	99%	100%	100%	2	2	1	1
D10	90%	100%	100%	100%	2	1	1	1
D11	100%	100%	100%	100%	1	1	1	1
D12	90%	97%	100%	100%	2	4	1	1
D13	90%	90%	95%	95%	2	5	3	2
D14	90%	100%	100%	100%	2	1	1	1
D15	90%	90%	90%	90%	2	5	4	3

Observa-se que, com o acréscimo da quantidade de MF_s , ocorre o aumento do número de dutos sobre a fronteira de risco. Isto se deve a limitação existente na relação entre o número de dutos flexíveis e MF_s considerados. Os modelos $\beta_3 R5$ e $\beta_6 R8$ apresentam dois e cinco MF_s , respectivamente. A dificuldade na ordenação entre dutos críticos e não-críticos, a partir do modelo $\beta_5 R7$, significa que quanto maior for o número de MF_s , mais crítico será o duto e mais rápido perderá sua integridade estrutural. O modelo $\beta_3 R5$ apresenta alto poder de discriminação entre dutos. Isto significa que alguns dutos críticos podem não conquistar a fronteira de risco máximo. Esta limitação

pode ser eliminada reduzindo-se o número de dutos. Para o modelo β_3 R5 é possível construir uma envoltória bidimensional de alto risco e verificar o excesso de dutos flexíveis no interior da fronteira de risco (Figura 25).

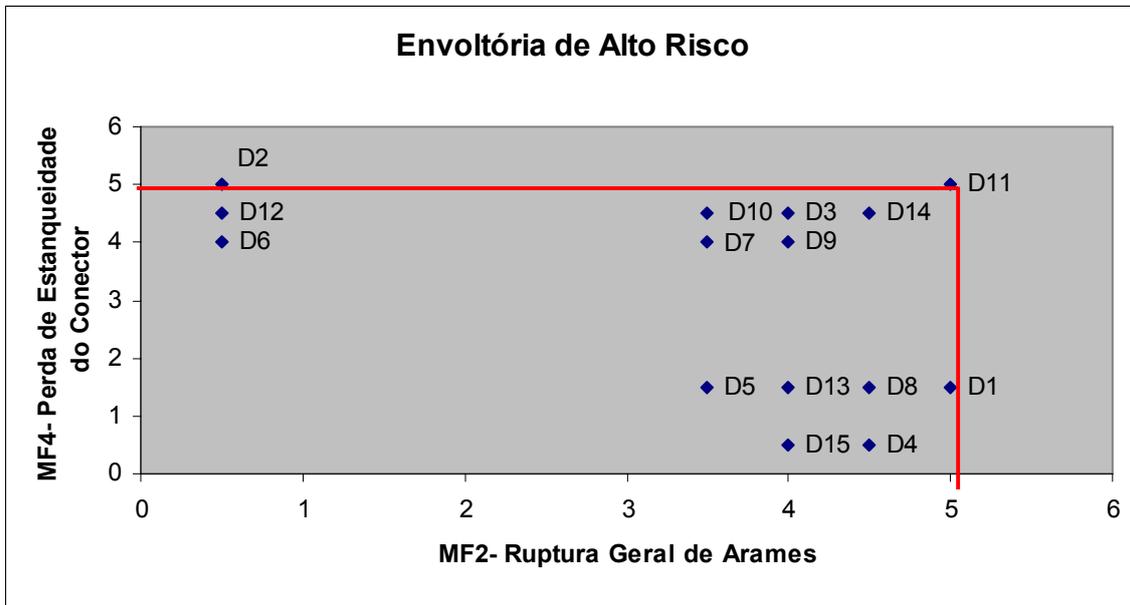


Figura 25 : Fronteira de alto risco com excessivo poder discriminatório entre risers (modelo - β_3 / Rodada - R5).

7.1.4 – Modelos Θ - Ranking DEA/SIAD (Flowline): Falha da Carcaça Interna (colapso ou destravamento) (MF1) x Destravamento (ou ruptura) da armadura de pressão (zeta) (MF3) x Entupimento do duto (MF6)

A aplicação do modelo DEA Risco para flowlines adotou o Critério 1 para obtenção de bons ranqueamentos de risco e os Critérios 2.1 e 2.2 para interpretação de duto mais crítico e menos crítico, respectivamente. O modelo (Θ_3 R9) adotou dois MF_s (MF1xMF3), enquanto que o modelo Θ_4 R10 considerou três MF_s (MF1xMF3x MF6).

Tabela 24: Fatores de Risco e ranking DEA/SIAD – Rodadas R9 e R10 (Flowline).

Duto Flexível Flowline (z)	Input $i = 1$	MF 1 $j = 1$	MF 3 $j = 2$	MF 6 $j = 3$	Fator de Risco $R_{Duto(z)}$ (%) ($\Theta_3 R9$)	Fator de Risco $R_{Duto(z)}$ (%) ($\Theta_4 R10$)	Ranking DEA SIAD ($\Theta_3 R9$)	Ranking DEA SIAD ($\Theta_4 R10$)
D1	1	2,4	3,7	0,5	74%	74%	4	5
D2	1	3	2,4	3,7	60%	94%	5	3
D3	1	5	4,4	0,5	100%	100%	1	1
D4	1	3,7	4,4	3,7	91%	100%	2	1
D5	1	0,5	2,4	5	48%	100%	6	1
D6	1	2,4	4,4	0,5	88%	88%	3	4
D7	1	3	4,4	2,4	88%	95%	3	2
D8	1	3,7	5	0,5	100%	100%	1	1
D9	1	0,5	4,4	2,4	88%	95%	3	2

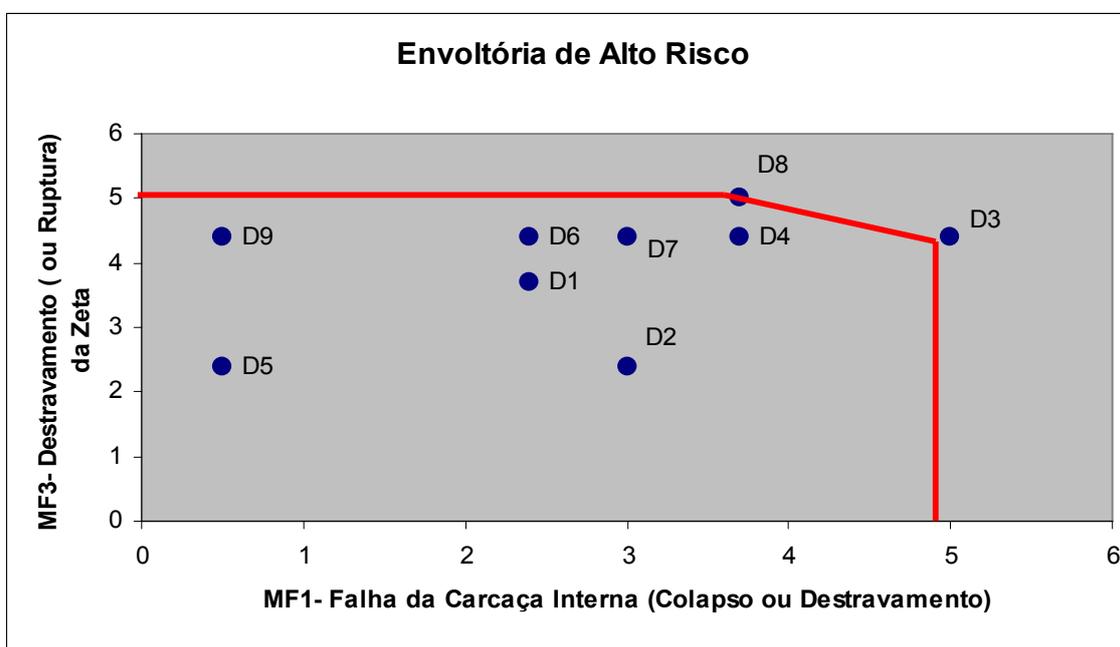


Figura 26 : Fronteira de alto risco com bom poder discriminatório entre flowlines (Modelo Θ_3 / Rodada R9).

O ranqueamento de risco (Tabela 24) para o modelo Θ_3 R9 considera os dutos D3 e D8 como os mais críticos, pois seguem o Critério 2.1. A presença de kink ou curvatura excessiva localizada ($\xi_{31} = 5$) e a corrosão moderada da armadura de pressão ($\xi_{32} = 4,4$) são as $NCI_{críticas}$ que contribuíram para o duto D3 atingir a fronteira de risco (Figura 26). Para o duto D8, a presença de ovalização excessiva ($\xi_{82} = 5$) e o $DO_{(pot)}$ vão livre excessivo ($\xi_{81} = 3,7$) garantem sua posição sobre a envoltória de risco. Todas essas $NCI_{críticas}$ ou $DO_{(pot)}$ representam estágios finais de mecanismos de falhas (Anexo 2). As $NCI_{críticas}$ de peso 5 podem gerar perda imediata de integridade estrutural devido a proximidade aos modos de falhas $MF1$ e $MF3$.

Os dutos D2 e D5 são os mais afastados da fronteira de risco, porque estão de acordo com o Critério 2.2, sendo que o D5 é o menos crítico ($Risco = 48\%$) por reunir ausência de $NCI_{crítica}$ ($\xi_{51} = 0,5$) que acarrete o $MF1$ e presença de interferência entre dutos ($\xi_{52} = 2,4$) no $MF3$. Vale lembrar que a interferência entre dutos inicia o MCF de danos na capa externa (abrasão e ruptura localizada), ingresso da água do mar no espaço anular do duto, e corrosão (leve, moderada e alta) da armadura de pressão. Neste caso, o duto D5 pode desenvolver o MCF mais longo do $MF3$. Os dutos D4, D6, D7 e D9 são os mais próximos da fronteira de risco (Figura 28).

Com o acréscimo do $MF6$, um novo ranqueamento de risco é obtido pelo modelo Θ_4 R10. Observa-se que ocorre um aumento do número de dutos sobre a envoltória de risco. Devido a presença de CO_2 ou H_2S no espaço anular ($\xi_{53} = 5$) e a interferência entre dutos ($\xi_{52} = 2,4$), o D5 adquire risco máximo. Vale ressaltar que a interferência entre dutos corresponde uma $NCI_{crítica}$ que inicia MCF_s que acarretam o destravamento (ou ruptura) da armadura de pressão (zeta) ($MF3$) ou entupimento do duto ($MF6$) (ver Anexo 2). Enquanto que o duto D4 atinge a envoltória de alto risco no modelo Θ_4 R10, devido ao acréscimo de danos (furo ou fissura) localizados na capa externa ($\xi_{43} = 3,7$) às $NCI_{críticas}$ vão livre excessivo ($\xi_{41} = 3,7$) e corrosão da armadura de pressão ($\xi_{42} = 4,4$).

7.2 – Ranqueamentos de Risco do Especialista - (Φ_E)

A fim de avaliar conceitualmente o comportamento estrutural dos dutos flexíveis danificados, é interessante realizar a comparação entre os rankings de risco obtidos pela modelagem DEA/SIAD e os rankings provenientes da opinião de um especialista em dutos flexíveis submarinos. A opinião do especialista consiste na sua participação em ranqueamentos subjetivos dos fatores de risco, baseado em suas próprias experiências. Neste momento, o analista sugere três métodos para o tratamento de dados empíricos. Esses dados correspondem aos pesos subjetivos ξ_{zj} das $NCI_{(críticas)}$ e $DOs_{(pot)}$ que representam cada modo de falha (MF).

Método 1 – Somatória (ξ_{jz})

Para a formação do primeiro ranking do especialista ($\Phi_E^{(1)}$), os fatores de risco (γ_{E1}) serão determinados a partir do somatório dos pesos subjetivos das $NCI_{(+críticas)}$ e $DOs_{(pot)}$. Desta forma considera-se que:

$$\gamma_{E1} = \left(\sum \xi_{NCI(+críticas)} + \sum \xi_{DO(pot)} \right) \quad (38)$$

Método 2 – Média Aritmética (ξ_{jz})

A segunda hipótese adotada pelo especialista para a construção do ranqueamento ($\Phi_E^{(2)}$) de risco potencial de falhas em dutos flexíveis, consiste na média aritmética dos pesos subjetivos das $NCI_{(+críticas)}$ e $DOs_{(pot)}$. Este método significa um tratamento de dados empíricos em metodologia científica, oferecendo uma visão estatística/probabilística. Assim, os fatores de risco (γ_{E2}) serão determinados por :

$$\gamma_{E2} = \frac{\sum_{j=1}^J (\xi_{NCI(+CRÍTICAS)} + \xi_{DO(pot)})}{J} = \frac{\sum_{j=1}^J \xi_{zj}}{J} \quad (39)$$

($j = 1,2,3,\dots$) onde, J – é a somatória do número de $NCI_{(+críticas)}$ e $DOs_{(pot)}$.

Método 3 – Não-conformidade mais crítica ($\xi_{NCI(+CRÍTICA)}$)

O terceiro método sugerido para formação do ranqueamento ($\Phi_E^{(3)}$) considera o fator de risco (γ_{E3}) igual ao peso da não-conformidade mais crítica, ou seja, a de maior peso do grupo de $NCI_{(+críticas)}$ ou $DOs_{(por)}$ considerados. Assim sendo,

$$\gamma_{E3} = \xi_{NCI(+crítica)} \quad \text{ou} \quad \gamma_{E3} = \xi_{DO(por)(+crítico)} \quad (40)$$

7.3 – Estudo Comparativo entre Ranqueamentos DEA/SIAD e Especialista (Φ_E)

Para os estudos comparativos entre os ranqueamentos de risco obtidos pelas modelagens e os ranqueamentos $\Phi_E^{(1)}$, $\Phi_E^{(2)}$ e $\Phi_E^{(3)}$ provenientes da opinião do especialista em dutos flexíveis foram escolhidos os seguintes modelos DEA Risco: $\Theta_1 R1$, $\Theta_2 R2$, $\beta_2 R4$ e $\beta_5 R7$. As Tabelas 25, 26, 27 e 28 abaixo registram as posições de cada duto nos ranqueamentos para o estudo comparativo em questão. As informações necessárias para a construção das tabelas anteriores foram retiradas das Tabelas 18, 19, 21 e 22, respectivamente.

Tabela (25) : Estudo comparativo – Especialista (Φ_E) x DEA/SIAD ($\Theta_1 R1$).

<i>Duto Riser Flexível (z)</i>	Risco $R_{Duto(z)}$ (%) ($\Theta_1 R1$)	Risco Subjetivo (γ_{E1}) Soma	Risco Subjetivo (γ_{E2}) Média	Risco Subjetivo (γ_{E3}) NCI_{máx}	RANK DEA SIAD ($\Theta_1 R1$)	RANK ($\Phi_E^{(1)}$) Soma	RANK ($\Phi_E^{(2)}$) Média	RANK ($\Phi_E^{(3)}$) NCI_{máx}
D1	100%	6	3	5	1	3	3	1
D2	100%	5,5	2,75	5	1	4	4	1
D3	100%	9	4,5	4,5	1	1	1	2
D4	90%	5	2,5	4,5	2	5	5	2
D5	70%	4,5	2,25	3,5	5	6	6	4
D6	80%	4,5	2,25	4	4	6	6	3
D7	87%	7,5	3,75	4	3	2	2	3

De acordo com a Tabela 25, os dois primeiros métodos do especialista (soma e média) fornecem os mesmos ranqueamentos de risco ($\Phi_E^{(1)}$ e $\Phi_E^{(2)}$). Os métodos 1 e 2 do especialista convergem resultados para o duto mais crítico (D3) e o duto menos crítico (D5) em comparação com o ranqueamento DEA/SIAD (modelo - $\Theta_1 R1$). Enquanto que a modelagem DEA atribui risco máximo aos dutos D1 e D2, o método da soma ($\Phi_E^{(1)}$) fornece visão menos rigorosa neste ranqueamento. O especialista considera o duto D1 na 3ª posição, e o D2 na 4ª posição. A DEA diverge o resultado para o duto D4, ficando este na 2ª posição do ranqueamento e na penúltima posição segundo a avaliação de risco $\Phi_E^{(1)}$ do especialista. O método 3 ($NCI_{(+críticas)}$) diverge seu ranqueamento com os dois primeiros métodos do especialista, apresentando posições para o duto mais (ou menos) críticos semelhantes aos do ranking DEA.

A Tabela 26 permite o estudo comparativo entre os ranqueamentos de risco do modelo $\Theta_2 R2$ e do especialista (Φ_E). Novamente os métodos da soma ($\Phi_E^{(1)}$) e média ($\Phi_E^{(2)}$) oferecidos pelo especialista fornecem os mesmos ranqueamentos de risco.

Tabela 26 : Estudo comparativo – Especialista (Φ_E) x DEA/SIAD ($\Theta_2 R2$).

<i>Duto</i> <i>Riser</i> <i>Flexível</i> (z)	Risco $R_{Duto(z)}$ (%) ($\Theta_2 R2$)	Risco <i>Subjetivo</i> (γ_{E1}) Soma	Risco <i>Subjetivo</i> (γ_{E2}) Média	Risco <i>Subjetivo</i> (γ_{E3}) $NCI_{máx}$	RANK DEA SIAD ($\Theta_2 R2$)	RANK ($\Phi_E^{(1)}$) Soma	RANK ($\Phi_E^{(2)}$) Média	RANK ($\Phi_E^{(3)}$) $NCI_{máx}$
D1	64%	6	3	3	6	5	5	5
D2	83%	7,5	3,75	4	3	3	3	3
D3	70%	4	2	3,5	5	7	7	4
D4	100%	9,5	4,75	5	1	1	1	1
D5	100%	8,5	4,25	5	1	2	2	1
D6	60%	3,5	1,25	3	7	8	8	5
D7	100%	5,5	2,75	5	1	6	6	1
D8	81%	7	3,5	4	4	4	4	3
D9	90%	7,5	3,75	4,5	2	3	3	2

O ranqueamento de risco DEA/SIAD $\Theta_2 R2$ e todos os métodos do especialista atribuem risco máximo ao duto D4 e risco mínimo ao duto D6. No entanto, o duto D7 foi considerado na 1° posição no modelo DEA e na 6° posição pelo método da somatória ($\Phi_E^{(1)}$). Isto ocorre porque a DEA atribui exclusiva importância ao dano (ruptura ou rasgo) generalizado na capa externa ($\xi_{72} = 5$). Este fato também ocorre com o duto D4. Onde a DEA atribui peso $\varphi_{14} = 0$ a baixa pressão de operação ($\xi_{41} = 4,5$), enquanto que o espaço anular com agentes corrosivos ($\xi_{42} = 5$), garante a presença do D4 na envoltória de risco.

Os dutos D5 e D7 foram considerados de risco máximo pelo modelo DEA e o método da não-conformidade mais crítica do especialista. Isto significa que ambos atribuem total importância as $NCI_{críticas}$ de peso 5 no ranqueamento de dutos críticos. Porém, os métodos da soma e da média dos pesos, oferecem uma visão menos rigorosa, pois consideram todas as $NCI_{críticas}$ ($\xi_{zj} = 5$ ou $\xi_{zj} \neq 5$) no ranqueamento de dutos críticos.

O duto D6 foi o menos crítico, e ocupa a última posição em todos os ranqueamentos considerados. Isto se deve a presença única de interferência entre risers ($\xi_{61} = 3$) e ausência de $NCI_{críticas}$ ($\xi_{62} = 0,5$) que acarretem o MF6 (entupimento do duto). Verifica-se que os métodos do especialista estão de acordo com os Critérios 2.1 e 2.2 para o reconhecimento dos dutos mais (ou menos) críticos.

A fim de comparar os ranqueamentos de risco do especialista (Φ_E) com os modelos β (Critério 1) serão investigados os modelos $\beta_2 R4$ e $\beta_5 R7$. Com base na Tabela 27, a seguir, o estudo comparativo revela que o modelo DEA $\beta_2 R4$ e o método 3 das $NCI_{(+críticas)}$ apresentam o mesmo ranqueamento de risco. Neste caso, o especialista apresenta o mesmo problema DEA de baixa discriminação entre dutos, oferecendo uma visão rigorosa ao considerar o fator de risco igual ao peso da $NCI_{(+crítica)}$. De acordo com a Tabela 21, observa-se que para todos os dutos de risco máximo ($R = 1$), a DEA $\beta_2 R4$ atribui pesos φ_{zj} nulos a todas as $NCI_{críticas}$ que apresentam $\xi_{zj} \neq 5$. Prevalecendo a importância excessiva dedicada as $NCI_{críticas}$ com pesos $\xi_{zj} = 5$.

Tabela 27 : Estudo comparativo – Especialista (Φ_E) x DEA/SIAD ($\beta_2 R4$).

Duto Riser Flexível (z)	Risco $R_{Duto(z)}$ (%) ($\beta_2 R4$)	Risco Subjetivo (γ_{E1}) Soma	Risco Subjetivo (γ_{E2}) Média	Risco Subjetivo (γ_{E3}) $NCI_{m\acute{a}x}$	RANK DEA SIAD ($\beta_2 R4$)	RANK ($\Phi_E^{(1)}$) Soma	RANK ($\Phi_E^{(2)}$) Média	RANK ($\Phi_E^{(3)}$) $NCI_{m\acute{a}x}$
D1	100%	10	3,3	5	1	6	6	1
D2	84%	8	2,6	4	3	9	9	3
D3	100%	13,5	4,5	5	1	2	2	1
D4	100%	12,5	4,1	5	1	3	3	1
D5	100%	6	2	5	1	11	11	1
D6	100%	9,5	3,1	5	1	7	7	1
D7	100%	11	3,6	5	1	5	5	1
D8	100%	12	4	5	1	4	4	1
D9	100%	14	4,6	5	1	1	1	1
D10	100%	8,5	2,8	5	1	8	8	1
D11	70%	7	2,3	3,5	4	10	10	4
D12	91%	8	2,6	4,5	2	9	9	2

Os métodos $\Phi_E^{(1)}$ (soma) e $\Phi_E^{(2)}$ (média) apresentaram ranqueamentos idênticos e com ótimo poder discriminatório entre os dutos D3 até D10. Neste caso, o duto D5 ocupa a última posição nestes ranqueamentos. Seguindo o Critério 2.2, o D5 não apresentou $NCI_{críticas}$ que gerassem MCF_s de colapso (ou destravamento) da carcaça interna ($MF1$) ou ruptura da barreira de vedação ($MF6$). Verifica-se que os ranqueamentos $\Phi_E^{(1)}$ e $\Phi_E^{(2)}$ apresentam menor rigor na identificação de dutos críticos, conseqüentemente maior distribuição nos posicionamentos de dutos.

Para todos os ranqueamentos, o duto D9 foi considerado o mais crítico por apresentar curvatura excessiva ($\xi_{91} = 4,5$), espaço anular com agentes corrosivos ou ruptura generalizada de capa externa ($\xi_{92} = 5$), e extrusão da barreira de vedação ($\xi_{93} = 4,5$).

O duto D11 foi considerado de menor risco para o modelo DEA (4ª posição) e em penúltima posição nos ranqueamentos $\Phi_E^{(1)}$ e $\Phi_E^{(2)}$ do especialista (10ª posição). Neste momento ocorre certa convergência de resultados entre todos os ranqueamentos. Seguindo o Critério 2.2, o duto D11 é menos crítico porque apresenta o $DO_{(pot)}$ duto em trincheira ($\xi_{(11),1} = 3,0$) e perda de flutuadores ($\xi_{(11),2} = 3,5$). Este duto não apresentou $NCI_{críticas}$ que gerassem MCF_s de ruptura da barreira de vedação (MF7).

Tabela 28 : Estudo comparativo – Especialista (Φ_E) x DEA/SIAD ($\beta_5 R7$).

Duto	Risco	Risco	Risco	Risco	RANK	RANK	RANK	RANK
Riser	$R_{Duto(z)}$	Subjetivo	Subjetivo	Subjetivo	DEA	$(\Phi_E^{(1)})$	$(\Phi_E^{(2)})$	$(\Phi_E^{(3)})$
Flexível	(%)	(γ_{E1})	(γ_{E2})	(γ_{E3})	SIAD	Soma	Média	$NCI_{máx}$
(z)	$(\beta_5 R7)$	Soma	Média	$NCI_{máx}$	$(\beta_5 R7)$			
D1	100%	13,5	3,4	5	1	7	7	1
D2	100%	10	2,5	5	1	8	8	1
D3	100%	17,5	4,3	4,5	1	1	1	2
D4	100%	15	3,7	5	1	5	5	1
D5	70%	5,5	1,3	3,5	6	11	11	4
D6	87%	9	2,2	4	5	9	9	3
D7	100%	17,5	4,3	5	1	1	1	1
D8	97%	14	3,5	4,5	2	6	6	2
D9	100%	17	4,2	4,5	1	2	2	2
D10	100%	16	4	5	1	4	4	1
D11	100%	13,5	3,3	5	1	7	7	1
D12	100%	13,5	3,3	4,5	1	7	7	2
D13	95%	13,5	3,3	4,5	3	7	7	2
D14	100%	16,5	4,1	4,5	1	3	3	2
D15	90%	6	1,5	4,5	4	10	10	2

De acordo com a Tabela 28 acima, os dutos D1, D2 e D11 são considerados de risco máximo pelo modelo DEA $\beta_5 R7$, enquanto que o especialista ($\Phi_E^{(1)}$ e $\Phi_E^{(2)}$) coloca-os nas últimas posições do ranqueamento. Novamente a DEA atribui risco máximo aos

duto com $NCI_{críticas}$ de peso $\xi_{zj} = 5$. No entanto, o método da somatória $\Phi_E^{(1)}$ considera todas as $NCI_{críticas}$ de pesos iguais ou diferentes de 5.

O método da somatória ($\Phi_E^{(1)}$) dos pesos subjetivos oferece bons ranqueamentos de risco. Isto significa que, em modelos com limitações DEA (Critério 1) o método da somatória fornece boa discriminação entre dutos mais (D7 – 1º posição) e menos críticos (D5 – 11º posição). Os ranqueamentos para os dois primeiros métodos do especialista estão de acordo com os Critérios 2.1 e 2.2.

Com base na Tabela 22, o D7 apresenta dano superficial da capa externa, ruptura de bending stiffener, trinca generalizada na barreira de vedação e ovalização excessiva. Estas significam $NCI_{críticas}$ de estágios finais em MCF_s de curta duração.

Verifica-se que o método $\Phi_E^{(3)}$ do especialista apresenta dutos em posições de risco muito próximas ou coincidentes ao ranqueamento do modelo DEA $\beta_5 R7$, confirmando o rigor na identificação de dutos críticos. Os modelos também consideram o duto D5 como sendo o menos crítico. Isto se deve ao fato do D5 não apresentar $NCI_{críticas}$ que acarretam os modos de falhas de colapso da carcaça interna $MF1$ e ruptura da barreira de vedação $MF7$. O duto D5 apresenta dano superficial na capa externa ($\xi_{51} = 3,5$) e falha na válvula de alívio ($\xi_{52} = 1,0$). Porém, o modelo DEA continua atribuindo excessiva importância as $NCI_{críticas}$ de peso $\xi_{zj} = 5$ para os dutos de risco máximo, além de pesos nulos às $NCI_{críticas}$ com $\xi_{zj} \neq 5$.

O duto D2 não deveria estar sobre a fronteira de alto risco, uma vez que apresenta ausência de $NCI_{críticas}$ nos modos de falhas $MF2$ e $MF7$. O risco máximo para o duto D2 indica o rigor do ranqueamento de risco DEA, fato não observado no método da somatória do especialista (8º posição $\Phi_E^{(1)}$). A Tabela 22 revela que o duto D14 (1º posição DEA $\beta_5 R7$) apresenta $NCI_{críticas}$ muito próximas de todos os MF_s considerados. No entanto, o duto D14 (3º posição do $\Phi_E^{(1)}$) é mais crítico do que o D2 (8º posição do $\Phi_E^{(1)}$) segundo o especialista.

7.4 – Modelo DEA Avançado com Restrições aos Pesos

Seguindo os enfoques de MEZA *et al.* (2005b), LINS *et al.* (2006b) e MELLO *et al.* (2003a) será aplicado o tópico DEA avançado de Restrição de Pesos dos MF_s . Este procedimento reduz o problema de baixa discriminação DEA (CCR) entre os dutos flexíveis mais e menos críticos. Desta forma, os modelos $\beta_1 R3$ e $\beta_2 R4$ serão corrigidos pelos modelos $\delta_1 R11$ e $\delta_2 R12$, respectivamente, com base no Critério 1.

De acordo com o ranqueamento do modelo $\beta_1 R3$ (Tabela 20), o modelo de correção $DEA_{Avançado}$ $\delta_1 R11$ possui um intervalo $[\psi_j, \rho_j]$ de contribuição aos pesos (ξ_{zj} e φ_{zj}) de cada $NCI_{critica}$ que representa o MF em questão. Este intervalo é baseado na importância que cada MF representa para o especialista ou usuário de dutos flexíveis. O método restringe a importância dos valores dos pesos subjetivos ξ_{zj} considerados.

O problema de programação linear (PPL) definido pelas equações 41, 42 e 43 indicado para o 1º duto do modelo $\delta_1 R11$, implementado pelo software SIAD, a partir dos pesos subjetivos ($\xi_{11} = 5$, $\xi_{12} = 0,5$ e $\xi_{13} = 4,5$) da Tabela 20, é o seguinte :

Fator de risco – Para o Duto D1 :

$$MAX (R_{DUTO(1)} = 5\varphi_{11} + 0,5\varphi_{12} + 4,5\varphi_{13}) \quad (41)$$

Sujeito a:

(i) Restrições DEA/CCR clássicas :

$$\left\{ \begin{array}{l} 5\varphi_{11} + 0,5\varphi_{12} + 4,5\varphi_{13} \leq 1 \rightarrow Duto1 \\ 4\varphi_{21} + 3,5\varphi_{22} + 0,5\varphi_{23} \leq 1 \rightarrow Duto2 \\ 4,5\varphi_{31} + 5\varphi_{32} + 4\varphi_{33} \leq 1 \rightarrow Duto3 \\ 4,5\varphi_{41} + 3\varphi_{42} + 5\varphi_{43} \leq 1 \rightarrow Duto4 \\ 0,5\varphi_{51} + 5\varphi_{52} + 0,5\varphi_{53} \leq 1 \rightarrow Duto5 \\ 5\varphi_{61} + 0,5\varphi_{62} + 4\varphi_{63} \leq 1 \rightarrow Duto6 \\ 3\varphi_{71} + 3\varphi_{72} + 5\varphi_{73} \leq 1 \rightarrow Duto7 \\ \varphi_{zj} \geq 0, (j = 1,2,3), (z = 1,2,3,4,5,6,7) \end{array} \right. \quad (42)$$

(ii) Restrições adicional aos pesos dos modos de falhas (DEA/Avançada) :

$$\left\{ \begin{array}{l} 40\% \leq \frac{5\varphi_{z1}}{5\varphi_{z1} + 0,5\varphi_{z2} + 4,5\varphi_{z3}} \leq 99\%, (z = 1, \dots, 7) \\ 5\% \leq \frac{0,5\varphi_{z2}}{5\varphi_{z1} + 0,5\varphi_{z2} + 4,5\varphi_{z3}} \leq 20\%, (z = 1, \dots, 7) \\ 30\% \leq \frac{4,5\varphi_{z3}}{5\varphi_{z1} + 0,5\varphi_{z2} + 4,5\varphi_{z3}} \leq 99\%, (z = 1, \dots, 7) \end{array} \right. \quad (43)$$

Sujeito aos limites de contribuição dos pesos indicados na Tabela 29:

Tabela 29 : Restrição aos pesos dos MF_s – modelo δ_1 / rodada R11.

Modos de Falhas (MF_s)	Limites de contribuição (especialista)
MF1 – Falha da Carcaça Interna	40% a 99%
MF6 – Entupimento do Duto	5% a 20%
MF7 – Ruptura da Barreira de Vedação	30% a 99%

Tabela 30 : Ranqueamento DEA/SIAD (Clássico e Avançado - δ_1 R11) e Especialista

$\Phi_E^{(1)}$.

Duto Flexível (z)	$R_{Duto(z)}$ (%) DEA/SIAD (sem restrição ao ξ_{zj}) (β_1 R3)	$R_{Duto(z)}$ (%) DEA/SIAD (com restrição ao ξ_{zj}) (δ_1 R11)	Fator de $R_{Duto(z)}$ Subjetivo (γ_{E1}) Soma	RANK DEA/SIAD (sem restrição ao ξ_{zj}) (β_1 R3)	RANK DEA/SIAD (com restrição ao ξ_{zj}) (δ_1 R11)	RANK Subjetivo ($\Phi_E^{(1)}$) Soma
D1	100%	74%	10	1	3	4
D2	80%	26%	8	2	5	6
D3	100%	100%	13,5	1	1	1
D4	100%	100%	12,5	1	1	2
D5	100%	13%	6	1	6	7
D6	100%	72%	9,5	1	4	5
D7	100%	83%	11	1	2	3

Verifica-se na Tabela 30 que a aplicação do modelo DEA com restrição aos pesos aumentam o poder discriminatório do modelo $\beta_1 R3$, pois ocorre redução do número de dutos sobre a fronteira de alto risco.

A fim de comparar os ranqueamentos obtidos pelo especialista e modelo DEA Risco de correção $\delta_1 R11$, foi escolhido o método da somatória dos pesos ($\Phi_E^{(1)}$). O estudo comparativo revela que o duto D3 é o mais crítico para todos os modelos, pois apresenta curvatura excessiva ($\xi_{31} = 4,5$), ruptura generalizada de capa externa ($\xi_{32} = 5$) e pressão interna alta de operação ($\xi_{33} = 4$). Estas significam $NCI_{críticas}$ próximas aos MF_s considerados na análise (Ver Critério 2.1). O duto D4 permanece na fronteira de alto risco para o modelo $\delta_1 R11$, porém para o especialista ($\Phi_E^{(1)}$) o duto ocupa a 2ª posição do ranqueamento. Neste caso, o especialista considera o duto D3 ($R_{duto(z)} = 1$) como sendo o mais crítico por possuir alta pressão de operação ($\xi_{33} = 4$). Enquanto que o duto D4 sai da fronteira de risco, segundo o especialista, devido à presença do DO_{pot} solo marinho abrasivo ($\xi_{42} = 3$) (ver Tabela 20).

Os dutos D2 e D5 oferecem menos risco de perda de integridade, segundo os ranqueamentos DEA/SIAD($\delta_1 R11$) e ($\Phi_E^{(1)}$). Sendo que o D5 é adequadamente reconhecido pelo modelo $\delta_1 R11$ como o menos crítico ($R_{duto(z)} = 13\%$). Este duto fica muito afastado da fronteira de risco por não apresentar $NCI_{críticas}$ que acarretem os modos de falhas $MF1$ e $MF7$.

Observa-se que o modelo $\delta_1 R11$ fornece bom ranqueamento de risco e eliminação de limitações, uma vez que os dutos mais e menos críticos estão de acordo com os Critérios 2.1 e 2.2. Ao ser especificada a importância ao peso de cada MF para o cálculo do risco, evita-se que alguma $NCI_{crítica}$ de menor importância domine a avaliação do fator de risco de um duto devido seu alto peso subjetivo ($\xi_{zj} = 5$). Outro ponto interessante é que $NCI_{críticas}$ importantes podem estar sendo ignoradas na análise de risco, isto acontece quando o PPL determina um peso objetivo zero à $NCI_{crítica}$ em questão. Estas

situações geram ranqueamentos de risco inadequados, pois dutos flexíveis menos críticos podem estar sobre a fronteira de alto risco.

Neste momento será apresentado a análise do modelo DEA Risco , proposto para corrigir as limitações do modelo $\beta_2 R4$. Para tal objetivo constrói-se o modelo $DEA_{Avançado} \delta_2 R12$ que impõe restrições (Equação 44) aos pesos dos modos de falhas da Tabela 31. Um PPL semelhante ao usado no modelo anterior (Equações 41 e 42) será aplicado para os 12 risers considerados. Os dados de entrada e saída do PPL correspondem aos pesos ξ_{zj} e φ_{zj} , respectivamente. Esses valores estão indicados na Tabela 31 a seguir:

Tabela 31 : Matriz de Pesos (Especialista e DEA) e Ranking DEA/SIAD (Avançado $\delta_2 /$ rodada R12)

Duto Riser Flexível (z)	Input (i = 1)		MF 1 (j = 1)		MF 6 (j = 2)		MF 7 (j = 3)		Risco ($\delta_2 R12$ $R_{Duto(z)}$ (%))	Ranking DEA/SIAD D ($\delta_2 R12$)
	α_{iz}	μ_{iz}	ξ_{zj}	φ_{zj}	ξ_{zj}	φ_{zj}	ξ_{zj}	φ_{zj}		
D1	1	1	5	0,14	0,5	0,2	4,5	0,04	54%	6
D2	1	1	3	0,1	3,5	0,14	0,5	0,4	33%	10
D3	1	1	4	0,03	5	0,1	4	0,08	94%	4
D4	1	1	4	0,03	3	0,03	5	0,15	98%	2
D5	1	1	0,5	0,6	5	0,1	0,5	0,4	20%	11
D6	1	1	5	0,4	0,5	0,2	4	0,05	53%	7
D7	1	1	3	0,05	3	0,03	5	0,15	93%	5
D8	1	1	5	0,14	3	0,03	4	0,05	97%	3
D9	1	1	4,5	0,06	5	0,1	4,5	0,04	100%	1
D10	1	1	3	0,05	0,5	0,2	5	0,15	52%	8
D11	1	1	3	0,1	3,5	0,14	0,5	0,4	33%	10
D12	1	1	0,5	0,3	3	0,03	4,5	0,16	44%	9

A DEA avançada com restrição aos pesos atribui intervalos de importância aos modos de falhas do duto. Portanto, as restrições adicionais aos pesos (ξ_{zj} e φ_{zj}) das $NCI_{críticas}$ de cada MF (Equação 44) correspondem a :

$$\left\{ \begin{array}{l} 15\% \leq MF1 \leq 70\% \\ 10\% \leq MF6 \leq 50\% \\ 20\% \leq MF7 \leq 80\% \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} 15\% \leq \frac{5\varphi_{z1}}{5\varphi_{z1} + 0,5\varphi_{z2} + 4,5\varphi_{z3}} \leq 70\%, (z = 1, \dots, 12) \\ 10\% \leq \frac{0,5\varphi_{z2}}{5\varphi_{z1} + 0,5\varphi_{z2} + 4,5\varphi_{z3}} \leq 50\%, (z = 1, \dots, 12) \\ 20\% \leq \frac{4,5\varphi_{z3}}{5\varphi_{z1} + 0,5\varphi_{z2} + 4,5\varphi_{z3}} \leq 80\%, (z = 1, \dots, 12) \end{array} \right. \quad (44)$$

Aplicando o problema de programação linear motivado pelas Equações 41 e 42, calcula-se os fatores de risco pelo software SIAD (MEZA *et al.*, 2005a). A Tabela 32, a seguir, apresenta os fatores de risco, ranqueamentos DEA (com ou sem restrições), além do método da somatória dos pesos ξ_{zj} ($\Phi_E^{(1)}$).

O estudo comparativo revela que o modelo DEA δ_2 R12 corrige a limitação do baixo poder discriminatório entre dutos flexíveis vistos em DEA β_2 R4. A aplicação do modelo δ_2 R12, com restrição aos pesos, reduziu totalmente o excesso de pesos φ_{zj} nulos atribuídos às $NCI_{críticas}$ com pesos $\xi_{zj} \neq 5$ (Tabela 31). Isto acarretou a saída de oito dutos da envoltória de risco, permanecendo somente o duto (D9) com risco máximo. O modelo β_2 R4 mostrou que todas as $NCI_{críticas}$ com pesos $\xi_{zj} = 5$ determinavam exclusivamente o risco relativo máximo de dutos flexíveis Tabela (21). Mesmo que esses dutos não possuíssem $NCI_{críticas}$, ou apresentassem $NCI_{críticas}$ de peso inferior a 5, eram considerados críticos.

Verifica-se que o duto D9 foi considerado o duto flexível mais crítico em todos os ranqueamentos de risco, uma vez que combina $NCI_{críticas}$ com os pesos mais altos, tais como: presença de curvatura excessiva $\xi_{91} = 4,5$, ruptura generalizada de capa externa $\xi_{92} = 5$ e extrusão da barreira de vedação $\xi_{93} = 4,5$ (Tabela 32). O duto D9 está sobre a envoltória de risco máximo por apresentar $NCI_{críticas}$ próximas (8º ou 9º estágios em MCF_s) aos MF_s . Neste caso, o Critério 3 classifica os MCF_s como sendo de curta duração.

Tabela 32 : Ranqueamento DEA/SIAD (Clássico e Avançado- δ_2 R12) e Especialista

$\Phi_E^{(1)}$.

Duto Flexível (z)	$R_{Duto(z)}$ (%) DEA/SIAD (sem restrição ao ξ_{zj}) β_2 R4	$R_{Duto(z)}$ (%) DEA/SIAD (com restrição ao ξ_{zj}) δ_2 R12	Fator de $R_{Duto(z)}$ Subjetivo (γ_{E1}) Soma	RANK DEA/SIAD (sem restrição ao ξ_{zj}) β_2 R4	RANK DEA/SIAD (com restrição ao ξ_{zj}) δ_2 R12	RANK Subjetivo ($\Phi_E^{(1)}$) Soma
D1	100%	54%	10	1	6	5
D2	84%	33%	7	3	10	9
D3	100%	94%	13	1	4	2
D4	100%	98%	12	1	2	3
D5	100%	20%	6	1	11	10
D6	100%	53%	9,5	1	7	6
D7	100%	93%	11	1	5	4
D8	100%	97%	12	1	3	3
D9	100%	100%	14	1	1	1
D10	100%	52%	8,5	1	8	7
D11	70%	33%	7	4	10	9
D12	91%	44%	8	2	9	8

O modelo DEA δ_2 R12 com restrição aos pesos retirou o duto D5 da envoltória de risco ($R_{duto(z)} = 20\%$). O modelo δ_2 R12 e o método da somatória do especialista ($\Phi_E^{(1)}$) reconhecem que o duto D5 é o menos crítico do grupo de risers. O D5 é o único duto que não possui $NCI_{críticas}$ que acarretem colapso da carcaça interna ($MF1$) e ruptura da barreira de vedação ($MF7$). O D5 apresenta somente ruptura generalizada da capa externa ($NCI_{crítica}$ com $\xi_{zj} = 5$), estágio anterior ao modo de falha MF_6 (entupimento do duto). O duto D11 é o segundo mais afastado da fronteira de risco ($R_{duto(z)} = 33\%$), uma vez que segue o Critério 2.2. O modelo DEA δ_2 R12 e o método da somatória ($\Phi_E^{(1)}$) fornecem ranqueamentos de risco que convergem na identificação dos dutos mais e

menos críticos. Permitindo ranqueamentos muito próximos para os dutos intermediários. Caso fosse utilizado o método 3 do especialista, os ranqueamentos de risco seriam os mesmos do DEA β_2 R4 para os dutos mais críticos. Isto ocorre porque o especialista considera o risco de perda total de integridade igual ao peso mais alto das $NCI_{críticas}$ ($\xi_{zj} = 5$). Enquanto que o DEA atribui a presença de $NCI_{críticas}$ de peso máximo ($\xi_{zj} = 5$) a exclusiva responsabilidade pela presença de dutos na envoltória de risco.

7.5 – Análise dos Resultados

Os modelos DEA (Θ ou δ) confirmaram os Critérios 2.1 e 2.2 para avaliação de ranqueamentos de dutos mais e menos críticos. Foi observado que a recomendação empírica de relação entre o número de dutos e MF_s fornece bons ranqueamentos de riscos relativos. Onde o modelo $DEA - \Theta$ e método da somatória ($\Phi_{E(soma)}^1$) apresentaram ranqueamento muito próximos para a maioria dos dutos, e coincidentes para os dutos mais e menos críticos.

Verificou-se que os modelos $DEA - \beta$ e o método (3) da $NCI_{(+crítica)}$ do especialista (Φ_E^3) apresentam visão rigorosa no ranqueamento de risco de dutos mais críticos ($R_{duto(z)} = 100\%$). Ambos atribuem importância excessiva a $NCI_{(+crítica)}$ de peso 5. Desta forma, esses dois métodos fornecem ranqueamentos de risco com baixo poder discriminatório, e com posições coincidentes para os dutos em questão.

Observou-se que os modelos $DEA - \delta$ avançados (com restrições aos pesos) fornecem ranqueamentos de risco muito próximos do método da somatória ($\Phi_{E(soma)}^1$) de pesos ξ_{zj} , proposto pelo especialista. Os métodos convergem resultados para o posicionamento de dutos mais e menos críticos, seguindo o enfoque dos Critérios 2.1 e 2.2.

Com relação aos métodos do especialista (Critério 1), verificam-se os mesmos resultados para os ranqueamentos de dutos obtidos por $\Phi_{E(soma)}^1$ e $\Phi_{E(média)}^2$. Ambos fornecem ranqueamentos de risco mais abrangentes do que os modelos limitados $DEA - \beta$.

Foi constatado que os modelos $DEA - \Theta$ (clássicos) reduzem a subjetividade do especialista, uma vez que atribuem pesos φ_{zj} nulos às $NCI_{(críticas)}$ com pesos $\xi \neq 5$. A DEA dedica para apenas uma $NCI_{(crítica)}$ de peso $\xi = 5$ a total atribuição de risco máximo ao duto (ver Tabelas 18 e 19). Isto significa que a modelagem oferece visão rigorosa no ranqueamento de risco, priorizando a $NCI_{(crítica)}$ ($\xi_{zj} = 5$) e desconsiderando outras $NCI_{(críticas)}$ ($\xi_{zj} \neq 5$) relevantes para atingir os MF_s . Significa que, para a DEA, um duto com 4 $NCI_{(críticas)}$ de pesos $\xi = 3,0;1,0;1,0;5,0$ será considerado crítico devido a presença do peso $\xi_{zj} = 5$. Enquanto que o especialista (método da somatória – $\Phi_{E(soma)}^1$) aumenta a subjetividade por considerar todas as $NCI_{(críticas)}$ presentes no duto para a determinação do risco.

O modelo $DEA - \beta$ concentra equivocadamente muitos dutos na envoltória de risco, não identificando adequadamente os dutos mais críticos. No entanto, o modelo $DEA - \delta$ (avançado) permite a eliminação total de pesos nulos (φ_{zj}), considerando a presença de todas as $NCI_{(críticas)}$ na determinação dos fatores de risco. De acordo com os resultados obtidos, o modelo $DEA - \delta$ aumentou o poder de discriminação com a saída de vários dutos flexíveis da fronteira de alto risco.

Os resultados DEA são confiáveis, pois são baseados em dados reais de inspeção e operação de dutos flexíveis (e não em fórmulas teóricas). O método permitiu a incorporação do conhecimento dos especialistas e usuários. No entanto, as fragilidades e limitações clássicas da metodologia DEA deverão ser controladas para o sucesso da modelagem. Os resultados mostraram que o usuário do modelo DEA risco deverá adotar os modelos $DEA - \Theta$ ($n \circ dutos$ igual ao dobro ou triplo do $n \circ MF_s$) ou $DEA - \delta$ (Restrição ao Peso). Estes modelos evitam o excesso de dutos flexíveis na envoltória de risco, eliminam o problema da flexibilidade de pesos. Outro ponto que foi relevante para obtenção de resultados aceitáveis foi a escolha correta de variáveis ($NCI_{(críticas)}$ e MF_s).

Capítulo 8 - Conclusões Finais

Esta dissertação contribui para a IBR de dutos flexíveis através do ranqueamento dos dutos mais críticos mediante a identificação das principais não-conformidades de inspeção ($NCI_{críticas}$), dados operacionais precipitadores de falhas (DO_{pot}), modos de falha (MF_s), mecanismos de falhas (MCF_s), obtidos a partir de inspeção visual durante o serviço. Outra contribuição importante para a IBR de dutos flexíveis submarinos corresponde à implementação do modelo computacional DEA (*Data Envelopment Analysis*) para avaliação de risco relativo e ranqueamentos de risco de dutos mais críticos.

Após a identificação dos mecanismos de falhas, foi sugerido um roteiro de IBR para dutos flexíveis o qual envolve a identificação das regiões críticas que oferecem maior risco a operação do duto flexível. Para o cálculo do fator de risco relativo de cada duto considerado, foi aplicada a metodologia da *Análise Envoltória de Dados (DEA)* com base em dados de inspeção e operação de dutos flexíveis.

A identificação dos (MCF_s) contribui para o planejamento de IBR de dutos flexíveis uma vez que permite o reconhecimento das $NCI_{críticas}$ e MF_s dos pontos mais críticos da estrutura. Com base na modelagem de programação linear em DEA procurou-se maximizar o risco relativo de falha potencial de dutos flexíveis submarinos. Os fatores de riscos foram calculados pelo software SIAD (MEZA *et al.*, 2005a), o qual implementa os modelos clássicos e avançados de DEA.

O modelo DEA Risco propõe uma metodologia para substituição da avaliação qualitativa do risco feita por FMECA, Matriz de Risco e RPN. Em DEA, o risco determinado oferece caráter relativo e abordagem matemática semi-quantitativa (intervenção de especialistas e uso de Programação Linear - Anexos 3 e 4).

Os principais benefícios que o modelo DEA oferece a IBR de dutos flexíveis são:

- (i) Ranqueamento dos dutos flexíveis mais e menos críticos através da comparação de fatores de risco relativos (DEA/SIAD). Permitindo a construção gráfica das envoltórias ou fronteiras bidimensionais de risco máximo. Justificativas dos ranqueamentos com base nos mecanismos de degradação propostos nos Anexos (1) e (2).

- (ii) Relacionamento entre os fatores de risco (DEA/SIAD) e os processos de deterioração e envelhecimento de dutos flexíveis. O modelo permite a utilização de dados reais de inspeção e operação, reunindo em um único fator de risco os MF_s , $NCI_{críticas}$ e $DO_{(pot)}$ mais relevantes dos MCF_s de dutos flexíveis.
- (iii) Cálculo do risco potencial de falha para um único duto através de vários conjuntos de pesos subjetivos (ξ_{jz}) determinados por especialistas a partir dos MCF_s de dutos flexíveis. A flexibilidade na escolha dos pesos a partir dos dados de inspeção ($NCI_{(críticas)}$) e operação (DO_{pot}) consiste num importante atrativo do modelo DEA Risco.
- (iv) Redução da subjetividade do especialista nos ranqueamentos de risco.
- (v) Auxiliar o especialista na tomada de decisão para o gerenciamento de integridade estrutural de dutos flexíveis. A DEA contribui na identificação de dutos mais críticos e menos críticos para a aplicação do programa de IBR em dutos flexíveis.

A análise dos resultados revelou ranqueamentos de risco (DEA/SIAD) satisfatórios e aceitáveis segundo as previsões e avaliação do especialista. Ou seja, dutos que apresentam $NCI_{(críticas)}$ próximas dos MF_s estarão sobre a envoltória de risco (Critério 2.1) . Dutos com $NCI_{(críticas)}$ de estágios iniciais de MCF_s , estarão no interior da envoltória de risco (Critério 2.2). Enquanto que os dutos flexíveis que apresentam $NCI_{(críticas)}$ de estágios intermediários ficarão próximos a fronteira de alto risco.

Neste trabalho, a DEA não está sendo proposta para substituir o ranqueamento de risco do especialista, mas sim, como uma ferramenta gerencial de apoio à decisão. A modelagem DEA adequada formaliza, com base em programação linear (Anexos 3 e 4), as previsões do especialista, modelando a realidade de dutos flexíveis.

A DEA consiste no indicador inicial para a investigação do especialista. Em modelos $DEA - \Theta$, o método não necessita de muitas $NCI_{(críticas)}$ para colocar o duto na fronteira de risco máximo. Um duto com apenas uma $NCI_{(crítica)}$ de estágio final, e outro com 3 $NCI_{(críticas)}$ de estágios finais, poderão estar sobre a envoltória de alto risco. Vale ressaltar que a perda de integridade estrutural (parada de produção) ocorrerá quando o

duto atingir o modo de falha total (MF). Neste caso, um duto será mais (ou menos) crítico quanto mais próximo (ou afastado) estiver da variável DEA (modo de falha - MF). O fato de dutos flexíveis estarem situados sobre a fronteira de risco, não implica na perda total de sua integridade, mas sim um alerta a tomada de decisão do especialista ou usuário.

Caberá ao especialista decidir, com base em sua experiência e nos ranqueamentos de risco DEA, qual duto deverá ser priorizado nas inspeções. Observa-se que a modelagem DEA adequada (Θ ou δ) reduz a subjetividade do especialista, com ranqueamentos de risco mais precisos e rigorosos.

Como sugestão para futuros trabalhos, recomendam-se:

- (1) Estender a modelagem DEA e ranqueamentos de risco para outras estruturas navais (cabos umbilicais, FPSOs, dutos rígidos (SCR), plataformas semi-submersíveis, etc);
- (2) Identificação de não-conformidades, modos de falhas e mecanismos de degradação para as estruturas navais indicadas na sugestão anterior;
- (3) Desenvolver equipamentos de inspeção que possibilitem melhor avaliação da integridade estrutural dos dutos flexíveis em operação e detecção de não-conformidades não observáveis, tais como a corrosão/erosão interna da carcaça intertravada;
- (4) Responder questões fundamentais do programa de IBR de dutos flexíveis tais como: Como, quando, e a que custo financeiro inspecionar ? Buscando a otimização do custo, tipo de inspeção/monitoramento e a periodicidade dessa inspeção.
- (5) Reconhecer que a lista de MF_s e MCF_s de dutos flexíveis não é exaustiva. Outros possíveis MCF_s que não estão presentes nesta dissertação poderão ser identificados e incluídos na avaliação de integridade desses dutos em futuros trabalhos. Poderão ser incluídos registros de defeitos de fabricação, erros de projeto, não-conformidades ocorridas durante o lançamento do duto, e não-conformidades não detectáveis em inspeção visual (eventos internos).

Referências Bibliográficas

API STD 581, 2000, **Risk-Based Inspection . Base Resource Document** , American Petroleum Institute, Washington, 1 ed.

ALFARO, J.L.C., 2003. **Introduction to Unbonded Flexible Pipe Manufacturing**. In: Course on Flexible Pipes and Umbilical Cables, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

API SPECIFICATION 17J, 2002. **Specification for Unbonded Flexible Pipe**, Washington, USA, American Petroleum Institute.

ALMEIDA, M. C., BRACK, M., FILHO, L. L. L., JORGE, N. M., 2005, "On the Integrity of Flexible Pipes for Subsea Applications", **Rio Pipeline Conference & Exposition**, IBP-1290_05, Rio de Janeiro, 17-19 Outubro.

API RP 17B, 2002. **Recommended Practice for Flexible Pipe**. 3 ed, March. Washington, USA, American Petroleum Institute.

API 17TR 2., 2003. **Technical Report - The Ageing of PA-11 in Flexible Pipes** . 1 ed. June , Washington, USA, American Petroleum Institute.

BRADBURY, M. E., ROUSE, P. , 2002 . " An application of data envelopment analysis to the evaluation of audit risk " . **ABACUS**, v. 38, n.2, pp.263-279.

BANKER, R.D., CHARNES, A., COOPER, W.W., 1984, " Some Models for Estimating Technical Scala Inefficiencies in Data Envelopment Analysis " . **Management Science** , v. 30, n.9 , pp. 1078-1092.

BERGE, S.ENGSETH,A.FYLLING,I., 1992. " Handbook on Design and Operation of Flexible Pipes " , **SINTEF Report – FPS 2000 Rsearch Programme**.

BAZARAA,M.S., JARVIS,J.J., SHERALI,H.D., 1990. **Linear Programming and Network Flows**, ed.2 . New York: John Wiley.

BELLONI, J.A., 2000. **Uma Metodologia de Avaliação da Eficiência Produtiva de Universidades Federais Brasileiras**. Tese de D. Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC., Brasil.

BOTTO, A., BANTI, C., O’SULLIVAN, E., 2008, “Managing Aging Flexible Riser Assets”. **Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference, 57811**, Estoril, 15-20 Junho.

CASA NOVA, S. P C.; MACEDO, M. A. S.; ALMEIDA, A, K., 2007 “Mapeamento e Análise Bibliométrica da Utilização da Análise Envoltória de Dados (DEA) em Estudos das Áreas de Contabilidade e Administração”. In: **ENANPAD**, 31. Rio de Janeiro: ANPAD.

CASA NOVA, S. P. C., SANTOS, A., 2005. “Proposta de um Modelo Estruturado de Análise de Demonstrações Contábeis”. **RAE - Eletrônica** - v. 4, n. 1, Art. 8, jan./jun. Disponível em : <http://www.rae.com.br/eletronica> Acesso em : 28 ago. 2009, 10:36:30.

COSTA, L.S.S., ALVES, T.M.J., 2002. “Resistência Residual de Linhas Flexíveis com Defeitos Naturais”. **6ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos**, Salvador, Brasil, Ago.

CORREIA, T.C.V.D., 2008. **Avaliação da Eficiência das Companhias Aéreas Brasileiras com Modelo DEA Nebuloso**. Dissertação de M. Sc., UFF. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CHARNES, A., COOPER, W.W., RHODES, E. ,1978, “ Measuring the efficiency of decision-making units” . **European Journal of Operational Research** , v. 2, p. 429-444.

COOPER, W.W., SEIFORD, L.M., TONE, K., 2000, **Data Envelopment Analysis: a Comprehensive Text With Models, Applications, References and DEA-Solver Software**. Boston, USA , Kluwer Academic Publishers.

COOPER, W.; SEIFORD, L.M.; ZHU, J., 2004, **Handbook on Data Envelopment Analysis** (International Series in Operations Research & Management Science). Boston, USA, Springer.

CHARNES, A., COOPER, W. W., RHODES, E., 1984. "The non-Achimedean CCR ratio for efficiency analysis: A rejoinder to Boyd and Fare" . **European Journal of Operational Research**, 15 , pp. 333-334.

CHEZHIAN M., MORK K., LESPINASSE P., FARRANT T., SOREIDE M., 2007 " **Riser Integrity Management – Recent Advances in the Deepwater Industry Practice** ". Det Norske Veritas, Total, BP, Statoil. Offshore Technology Conference – OTC 18904 , Houston, Texas, USA, 30April – 3 Maio.

CARNEVAL, R. O., COSTA, L. C. S., LONTRA F. L. L., SANTOS, J. M. , ALMEIDA, M. C., SOUZA, L. A. L., 2005, "Flexible Line Inspection", **IX International Chemical and Petroleum Industry Inspection Technology Conference**, Houston, Texas, USA.

CAMERINI C.S., MARINHO M.G., PIPA D.R., PIRES G.P., MOREIRA A.B., MORIKAWA S.R., SANTOS J.M., 2008, " **New Techniques for Integrity Management of Flexible Riser-End Fitting Connection** ".27TH International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE - 57929) , June 15-20, Estoril, Portugal.

DAVUTYAN, N., KAVUT, L., 2005." An application of data envelopment analysis to the evaluation of audit risk: A reinterpretation" . **ABACUS**, vol.41, n.3, pp.290-306.

GALVÃO, P.J.L.N., 2008. **Análise Envolvória de Dados Aplicada ao Setor Brasileiro de Distribuição de Energia Elétrica**. Dissertação M. Sc., Faculdade de Economia e Finanças IBMEC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

GARCIA, H.L., PINTO, E.D.P., NASCIMENTO, J.V.S.N., SOUZA, R.E.A.D., 2008 "Identificação dos Mecanismos de Danos Atuantes nos Equipamentos da Unidade de Processamento de Gás Natural de Petrobrás". **XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 13-16 outubro.

GOMES, J.S.F., MELLO, J.C.C.B.S., 2006. **Avaliação do Campeonato Mundial de Fórmula1 com Análise Envoltória de Dados**. Relatório de Pesquisa em Engenharia de Produção da UFF, v.6,n.6.

GONÇALVES, A.C., NORONHA,C.P., LINS,M.P.E., ALMEIDA,R.M.V.R., 2007 , “Análise Envoltória de Dados na Avaliação de Hospitais Públicos nas Capitais Brasileiras. **Revista Saúde Pública**, 41 (3) , pp. 427-235. COPPE/UFRJ, RJ, BRASIL

GOMES, E.G., MANGABEIRA, J.A.C., 2004, “ Uso de Análise Envoltória de Dados na Agricultura : O Caso de Holambra”. **Revista Engevista**, v.6,n.1(abril),pp.19-27.

GATTOUFI, S., ORAL, M., REISMAN,A., 2004. “ A Taxonomy for Data Envelopment Analysis. **Socio Economic Planning Sciences**,vol.38, n.2-3, pp.141-158.

GARCIA ,P.A.A., SCHIRRU, R., FRUTUOSO,P.F.M, 2005. “ A fuzzy data envelopment analysis approach for FMEA “. **Progress in Nuclear Energy**, vol.46, no.3-4, pp.359-373.

HENRY, F. A , LEMBEYE , P., 2004, “Flexible Pipes in-Service Monitoring”, **23rd International Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering** , Vancouver, British Columbia, Canada, paper OMAE2004-51348.

JUNIOR , S.C.O., 2006a, **Estudo Numérico-Experimental de Dutos Metal-Compósito sob Carregamento de Pressão Hidrostática**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro,RJ, Brasil.

JUNIOR, S.F.G., 2006b. **Métodos não convencionais de restrições aos pesos em DEA. Aplicados ao campeonato mundial de fórmula 1**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

JUNIOR, S.F.G., MELLO J.C.C.B.S., 2007, “ Utilização de modelo DEA com restrições cone rattoo não arquimedianas para avaliação dos pilotos no campeonato mundial de fórmula 1 do ano de 2006 ” . **Revista Eletrônica : Sistemas & Gestão**, v. 2, n. 3, p. 217-231, set-dez.

KMENTA, S., ISHII, K., 2004. " Scenario-Based Failure Modes and Effects Analysis Using Expected Cost ". **ASME Transactions, Journal of Mechanical Design**, vol.126, pp.1027-1035.

KASSAI, S., 2002. **Utilização da Análise por Envoltória de Dados (DEA) na Análise de Demonstrações Contábeis**. Tese de D. Sc. Departamento de Contabilidade e Atuária. Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade. USP. São Paulo: SP.

KANESIRO, J. C., 2008. **Desempenho Econômico-Financeiro e Análise Envoltória de Dados (DEA) : um estudo em meios de hospedagem no Brasil**. Dissertação M. Sc., Universidade do Vale do Itajaí – Univali, Balneário Camboriú, SC, Brasil.

LINS, M.P.E., MELLO, J.C.C.B.S., GOMES, E.G., MELLO, M.H.C.S., 2002." Método Multicritério para Seleção de Variáveis em Modelos DEA ". **Pesquisa Naval**, v.15, pp.55-66.

LINS, M.P.E., MEZA, L.A., 2000a. "A Análise Envoltória de Dados (DEA) através da utilização do Frontier Analyst ". **Pesquisa Operacional**, v.19, n.2, pp.287-293.

LINS, M.P.E., MEZA, L.A., 2000b. **Análise Envoltória de Dados e Perspectivas da Integração no Ambiente do Apoio a Decisão**. 1 ed. Rio de Janeiro. Ed. COPPE/UFRJ.

LINS, M.P.E., CALÔBA, G.M., 2006a. **Programação Linear com aplicações em teoria dos jogos e avaliação de desempenho (Data Envelopment Analysis)**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência. v. 1. 299 p.

LINS, M.P.E., CANEN, A.G., VASCONCELLOS, V.A., 2006b. "Identificando as melhores práticas operacionais através da associação Benchmarking-DEA: O caso das refinarias de petróleo". **Pesquisa Operacional**, v.26, n.1, Rio de Janeiro, jan./Abr.

LINS, M.P.E., M.P.L., ALCÂNTARA, A.A.M., SANT'ANNA, A.P., 2003. " Restringindo flexibilidade de pesos em DEA utilizando análise de regressão MSEA". **Pesquisa Operacional**, V.23, n.2, Rio de Janeiro Aug.

LISBOA, E.F.A., 2002, “ Curso Pesquisa Operacional “. Disponível em :
< <http://www.ericolisboa.eng.br> >. Acesso em: 15 set. 2009, 17:33.

LOBIANCO, S.L.A., SIMÕES, F.S., FILHO, I.D.A.M., 2003 “**Manual para Monitoramento/Inspeção de Linha Flexível Submarina – Inspeção Baseada em Risco-IBR**”. Bol. téc. Petrobras, Rio de Janeiro, 46 (3/4): 270 - 281, jul./dez.

LEMONS, C.A.D.D., 2005. **Análise de Fadiga em Risers Flexíveis**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MACEDO, M.A.S, BENGIO, M.C., 2003. “Avaliação de eficiência organizacional através de Análise Envoltória de Dados”. **VIII Congresso Internacional de Custos**. Punta Del Este, Uruguay, 26 - 28 nov.

MARINHO, M.G, CAMERINI, C.S., SANTOS, J.M., PIRES G.P., 2007. “Surface Monitoring Techniques for a Continuous Flexible Riser Integrity Assessment “. **OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE (OTC) 18946**. Houston ,Texas , USA, 30 Abri l- 3 Maio .

MARINHO,M.G, SANTOS,J.M., CARNEVAL ,R.O., 2006. ”Integrity Assessment and Repair Techniques of Flexible Risers” . **25TH International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE - 92467)** , Hamburg, Alemanha,June 4-6.

MACHADO, J.M., REIS, C.F.M.D., BOECHAT, F.M.B., 2002, “ Planejamento Baseado em Risco do Programa de Inspeções à Fadiga em Unidades Estacionárias de Produção”.**19 ° Congresso nacional de transportes marítimos, construção naval e offshore – SOBENA**, 91, Rio de Janeiro, Brasil, 21-25 Outubro.

MCS INTERNATIONAL AND UKOOA., 2001, “**State of the Art Flexible Riser Integrity Issues Study Report**” . Doc No. 2-1-4-181/ SR01 Revision 4, April, pp 30-34 , pp 39-42.

MCS INTERNATIONAL AND UKOOA Guidance Note., 2002, “**Monitoring Methods and Integrity Assurance for Unbonded Flexible Pipe** ” . Doc No. 2-1-4-221/ GN01 Revision 5, October , pp 06-52.

MARINHO M. G., BARROS J. G., 2002, "Underwater Repair of Flexible Risers", **1st E&P Seminar of Maintenance and Equipment Inspection**, Salvador, BA, Brazil.

MEZA, L.A., BIONDI, L.; . MELLO, J.C.C.B.S.; GOMES, E. G., 2005a, "ISYDS– Integrated System for Decision Support (SIAD – Sistema Integrado de Apoio a Decisão): a software package for data envelopment analysis model ". **Pesquisa Operacional**, v.25, n.3, p 493-503.

MEZA, L.A., MELLO, J.C.C.B.M., GOMES, E.G., SERAPIÃO, B.P., BIONDI L.N., 2005b. "Curso de Análise de Envoltória de Dados. Pesquisa Operacional e o Desenvolvimento Sustentável.". In: **XXXVII – SBPO- Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. Gramado, RS, Set.

MEZA, L.A., 1998. **Data Envelopment Analysis na determinação da Eficiência dos Programas de Pós-Graduação da COPPE-UFRJ**. Tese de Mestrado. Sc; COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

MEZA, L.A., RODRIGUES, R., 2009. "Avaliando a Eficiência de Equipes do Sistema de Manufatura – Um Estudo de Caso no Setor Siderúrgico". Disponível em : http://sobrapo.org.br/simposios/XLI-2009/XLI_SBPO_2009_artigos/artigos/55481.pdf . Acesso em : 14 set. 2009,18:32:30.

MELLO, J.C.C.B.S.; MEZA, L.A.; GOMES, E.G., MELLO, M.H.C.S., 2003a, " Uma Análise da qualidade e da produtividade de Programas de Pós-Graduação em Engenharia" . **Ensaio. Pesquisa em Educação em Ciências, Rio de Janeiro**, v. 39, n. 11, p. 167-179.

MELLO, J.C.C.B.S, GOMES, E.G., NETO, L.B., 2003b, "Avaliação da Eficiência por Análise de Envoltória de Dados: Conceitos, Aplicações à Agricultura e Integração com Sistemas de Informação Geográfica. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) Monitoramento por Satélite – Documentos**, 28. ed.1 , Ago, pp.1-39, Campinas,SP.

MELLO, J.C.C.B.S.; MEZA, L.A.; GOMES, E.G.; SERAPIÃO, B.P.; LINS, M.P.E., 2003c, Análise de Envoltória de Dados do estudo da eficiência e dos benchmarks para companhias aéreas brasileiras. **Revista Pesquisa Operacional**, v. 23, n. 2, p. 325-345, 2003.

MELLO, J.C.C.B.S., MEZA, L.A., NANJI, L.C., SENRA, L.F.A.C., 2007. "Estudo sobre Métodos de Seleção de Variáveis em DEA ". **Revista Pesquisa Operacional**, v.27, n.2, Rio de Janeiro , Maio/Ago.

MELLO, J.C.C.B.S., 2006. " Modelos DEA de input unitário com aparente orientação a inputs." In: **Anais do XXXVIII SBPO**, Goiânia.

NETTO T.A., FERREIRA M., GONÇALEZ V., TOUÇA J.M., MARNET R., 2008 " **Repair Techniques for Flexible Pipe External Sheath** ". Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering – OMAE 2008-57444 . June 15-20, Estoril, Portugal.

NUNAMAKER , T.R., GREENBERG, R., 1987, " A Generalized Multiple Criteria Model for Control and Evaluation of Nonprofit Organizations". **Financial Accountability and Management**, v. 3, n. 4.

NOGUEIRA V.P.P., 2008, **Análises Numéricas de Dutos Flexíveis Íntegros e Danificados sob Pressão Externa**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

OLIVEIRA, I.R., 2008. **Utilização da Análise Envoltória de Dados (DEA), no Diagnóstico da Eficiência de Cultivo do Camarão Marinho: Litopenaeus vannamei**. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife-PE, Brasil

PICKSLEY J.W., KAVANAGH K., MCS INTERNATIONAL, GARNHAM S., TURNER D., 2002, " **Managing the Integrity of Flexible Pipe Field Systems: Industry Guidelines and their Application to BP's West of Shetland Assets**. " Offshore Technology Conference – OTC 14064, Houston, Texas USA., 6-9 MAIO.

PEZZI, M.F., 2003, **Aplicação de IBR. Inspeção Baseada em Risco a Oleodutos segundo o API 581 BRD.Verificação de Consistência com as Práticas Usuais da Indústria para Avaliação de Risco.** Dissertação de Mestrado, PUC-RIO, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

RAMOS R.E.B., FERREIRA G.M., 2007a, “Análise Retornos de Escala Usando DEA : Um Estudo em Instituições de Ensino Tecnológico no Brasil” . **Gestão da Produção, Operações e Sistemas** , vol.5 (out-dez) , pp. 25- 38.

RAMOS R.E.B., 2007b, “Michael J.Farrell e a Medição da Eficiência Técnica”. In: **XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENGEPP). Integração, Projeto e Sustentabilidade. Foz do Iguaçu**, PR, Brasil, 09 -11 outubro.

SHNEIDER, A.B., LOPES, A.L.M., ADRIANO, A.P., CARNEIRO, M.L., LIMA, M.V.A, 2009. “Otimização de Carteiras Seleccionadas por Análise Envoltória de Dados – DEA” In: **XLI SBPO: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2009, Porto Seguro / BA. XLI Anais da SBPO. SÃO PAULO, 2009. v. XLI.

SEYED-HOSSEINI , S. M., SAFAEI, N., ASGHANPOUR, M. J., 2006. “ Repriorization of Failures in a System Failure Mode and Effects Analysis by Decision Making Trial and Evaluation Laboratory Technique” . **Reliability Engineering and System Safety**, vol. 91, nº 9, pp. 872 –881.

SANKAR, N.R., PRABHU , B.S., 2001. “ Modified Approach for Priorization of Failures in a System Failure Mode and Effects Analysis ”. **International Journal of Quality and Reliability Management**, vol.18, n.3, pp.324-336.

SEIFORD, L. M., CHARNES, A., COOPER , W. W., LEWIN, A. Y., 1994, **Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology and Applications**, USA, Kluwer Academic Publishers

SOUSA, J.R.M., 2005. **Análise Local de Linhas Flexíveis pelo Método dos Elementos Finitos.** Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

SMITH, R., O'BRIEN, P., O'SULLIVAN, T., *et al.*, 2007, " Fatigue Analysis of Unbonded Flexible Risers With Irregular Seas and Hysteresis ". **Offshore Tecnology Conference**, 18905, Houston, Texas, USA, 30 April – 3 May .

SINHA, S.K., MCKIM, R.A., 2007. "Probabilistic based integrated pipeline management system" . **Tunelling and Underground Space Technology**, vol.22, pp. 543-552.

SIMÕES F.S, PEZZI F.M., CASAPRIMA.E., BERRY, N., ALMEIDA, T., 2007. "**Desenvolvimento de Metodologia para Gerenciamento da Integridade de SCRs Baseada em Risco**". Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP(1234_07). Rio Pipeline Conference & Exposition, 02-04 outubro

SIMÕES, F., S., LOBIANCO, S.L.A., ALMEIDA, M. C. de , 2003, "**Flexible Line Inspection Methodology Based on RBI**", Final Report of PETROBRAS Research & Development Project 600544, Brazil.

SIMÕES, F., S., LOBIANCO, S.L.A., FILHO, I.D.A.M., 2001. "**Manual para Monitoramento / Inspeção de Linhas Flexível Submarino Inspeção Baseada em Risco – IBR** ", 3rd Seminar on Pipeline, IBP-4201, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.2001.

SILVA, A.P.D., 2006, "**Análise da Influência da Temperatura na Rigidez à Flexão de Linhas Flexíveis**". Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SORENSEN, J.D., STRAUB, D., GOYET, J., 2006 . " Benefits of Based Inspection Plannig for Offshore Structures " . **25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, 92089, Hamburg, Germany, 4 - 9 June.

STRAUB, D., FABER M.H., 2005, " Risk Based Inspection Planning for Strutural Systems ". **Revista Elsevier Ltda – Science Direct – Structural Safety** , n.27(Agosto) , pp. 335-355.

TIEN, S.W., HWANG, W.T., TSAI, C.H., 2007 “ Study os a Risk-Based Piping Inspection Guideline System “. **Revista Elsevier Ltda – Science Direct – ISA Transsactions** n.46, (Fev), pp.119-126.

TALLURI ,S.,2000. **Data envelopment analysis**. *Decision Line*, May, pp.8-11.

VAN DE LOO P.J., OUT J.M.M., KRONEMEIJER D.A. , STERKE A.D., 1995 ” **The Integrity of Flexible Pipe: Search for an Inspection Strategy** “. Elsevier Science Ltda. Engineering Structures, vol. 17, n° 4, pp.305-314 , 1995. Shell Research, Amsterdam, The Netherlands.

VILELA, D.L., NAGANO, M.S., 2004. “Aplicação da Análise Envoltória de Dados – DEA em Cooperativas de Crédito Rural ” . In: **XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENGEPP** . Florianópolis, SC, Brasil, 3-5 (Nov.).

XAVIER, M.L., 2006, **Instalação de Dutos Flexíveis em Águas Ultraprofundas**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro,RJ, Brasil.

ZHANG, Y., CHEN, B., QIU, L., CASE, M., 2003, “State of the Art Analytical Tools Improve Otimization of Unbonded Flexible Pipes for Deepwater Environments”, **Offshore Technology Conference (OTC)**, OTC-15169, Houston, 5-8 May.

WILLIAMS, P.R. ,2003 .“ The Reliability of Flexible Pipe and its Failure Modes “. Wellstream International Ltd. Newcastle Tyne, UK. **The Journal of Pipeline Integrity**. pp. 209-222.

ANEXO 1

Mecanismo de Falhas Potenciais de Duto Flexível Submarino para aplicação Riser e/ou Flowline

1ª Categoria : Riser (Aplicação Dinâmica)

MODO DE FALHA 1 - FALHA DA CARÇAÇA INTERNA (Colapso ou Destravamento)

MECANISMO DE FALHA - RISER									
Estágio 1 <i>LC = 9</i> $\xi_{NCI} = 1$	Estágio 2 <i>NC = 8</i> $\xi_{NCI} = 1,5$	Estágio 3 <i>NC = 7</i> $\xi_{NCI} = 2$	Estágio 4 <i>NC = 6</i> $\xi_{NCI} = 2,5$	Estágio 5 <i>NC = 5</i> $\xi_{NCI} = 3$	Estágio 6 <i>NC = 4</i> $\xi_{NCI} = 3,5$	Estágio 7 <i>NC = 3</i> $\xi_{NCI} = 4$	Estágio 8 <i>NC = 2</i> $\xi_{NCI} = 4,5$	Estágio 9 <i>NC = 1</i> $\xi_{NCI} = 5$	Estágio 10 (Modo de Falha)
			****DO[6,7]	[1] Dano superficial da capa externa (abrasão, desgaste, corte)	Dano localizado na capa externa (furo , fissura, trinca)	Dano Generalizado na capa externa (ruptura , rasgo) *****DO[1,8]	Torção excessiva * DO [1,3,8]	Gaiola de passarinho	Falha da Carcaça Interna (Colapso ou Destravamento)
				** DO[5]	[2] Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H₂S, CO₂) ** DO[5]	Corrosão leve da carcaça	Corrosão moderada da carcaça	Corrosão alta da carcaça	Falha da Carcaça Interna (Colapso ou Destravamento)
				***** DO[1,8]	[3] Ângulo de catenária inadequado	Curvatura excessiva ***DO [1,7,8]	Kink (curvatura excessiva localizada)	Ovalização excessiva	Falha da Carcaça Interna (Colapso ou Destravamento)
								[4] Ovalização excessiva	Falha da Carcaça Interna (Colapso ou Destravamento)

* $DO_{(pot)}$ [1,3,8] – gaiola de passarinho ; ** $DO_{(pot)}$ [5] – Corrosão da carcaça ; Espaço anular c/ ag. Corrosivo; *** $DO_{(pot)}$ [1,7,8] – Kink; *****

$DO_{(pot)}$ [6,7] –Dano Sup. Capa Ext. ***** $DO_{(pot)}$ [1,8] – Âng. Cat. Inad., Torção Excessiva;

MODO DE FALHA 2 - RUPTURA GENERALIZADA DE ARAMES DA ARMADURA DE TRAÇÃO

MECANISMO DE FALHA - RISER									
Estágio 1 <i>LC = 9</i> $\xi_{NCI} = 1$	Estágio 2 <i>NC = 8</i> $\xi_{NCI} = 1,5$	Estágio 3 <i>NC = 7</i> $\xi_{NCI} = 2$	Estágio 4 <i>NC = 6</i> $\xi_{NCI} = 2,5$	Estágio 5 <i>NC = 5</i> $\xi_{NCI} = 3$	Estágio 6 <i>NC = 4</i> $\xi_{NCI} = 3,5$	Estágio 7 <i>NC = 3</i> $\xi_{NCI} = 4$	Estágio 8 <i>NC = 2</i> $\xi_{NCI} = 4,5$	Estágio 9 <i>NC = 1</i> $\xi_{NCI} = 5$	Estágio 10 (Modo de Falha)
[1] <i>Interferência entre dutos/ cruzamento</i> ***DO[6,7]	<i>Dano superficial da capa externa (abrasão, desgaste, corte)</i>	<i>Dano localizado na capa externa (furo , fissura, trinca)</i> *****DO[5]	<i>Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H₂S, CO₂, água do mar)</i>	<i>Corrosão leve dos arames da armadura de tração</i>	<i>Corrosão moderada dos arames da armadura de tração</i>	<i>Corrosão alta dos arames da armadura de tração</i>	<i>Ruptura localizada de arames da armadura de tração</i> *DO[1,8]	<i>Torção excessiva</i>	<i>Ruptura Generalizada de Arames da Armadura de Tração</i>
DO[6,7]	[2] <i>Dano superficial da capa externa (abrasão, desgaste, corte)</i>	<i>Dano localizado na capa externa (furo , fissura, trinca)</i> **DO[5]	<i>Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H₂S, CO₂, água do mar)</i>	<i>Corrosão leve dos arames da armadura de tração</i>	<i>Corrosão moderada dos arames da armadura de tração</i>	<i>Corrosão alta dos arames da armadura de tração</i>	<i>Ruptura localizada de arames da armadura de tração</i> *DO[1,8]	<i>Torção excessiva</i>	<i>Ruptura Generalizada de Arames da Armadura de Tração</i>
					[3] <i>Ângulo de catenária inadequado</i> ****DO[1,7,8]	<i>Curvatura excessiva</i> ****DO[1,7,8]	<i>Kink curvatura excessiva Localizada</i> **DO[5,8]	<i>Ruptura localizada de arames da armadura de tração</i>	<i>Ruptura Generalizada de Arames da Armadura de Tração</i>

* $DO_{(pot)}$ [1,8] – Torção excessiva; Âng. Cat. Inad. ; ** $DO_{(pot)}$ [5,8] – Rup. Localiz. Arames; *** $DO_{(pot)}$ [6,7] –Dano Sup. Capa Ext.;

**** $DO_{(pot)}$ [1,7,8] – Curvatura excessiva, Kink; ***** $DO_{(pot)}$ [5]- Espaço anular c/ ag. Corrosivo;

MECANISMO DE FALHA - RISER									
Estágio 1 <i>LC</i> = 9 $\xi_{NCI} = 1$	Estágio 2 <i>NC</i> = 8 $\xi_{NCI} = 1,5$	Estágio 3 <i>NC</i> = 7 $\xi_{NCI} = 2$	Estágio 4 <i>NC</i> = 6 $\xi_{NCI} = 2,5$	Estágio 5 <i>NC</i> = 5 $\xi_{NCI} = 3$	Estágio 6 <i>NC</i> = 4 $\xi_{NCI} = 3,5$	Estágio 7 <i>NC</i> = 3 $\xi_{NCI} = 4$	Estágio 8 <i>NC</i> = 2 $\xi_{NCI} = 4,5$	Estágio 9 <i>NC</i> = 1 $\xi_{NCI} = 5$	Estágio 10 (Modo de Falha)
			[4] Ângulo de catenária inadequado **** DO[1,7,8]	Curvatura excessiva **** DO[1,7,8]	Kink (curvatura excessiva localizada na região de topo) ***DO[8]	Ruptura do Bend Stiffener na região de topo (perda de funcionalidade)	Ruptura localizada de arames da armadura de tração *DO[1,8]	Torção excessiva	Ruptura Generalizada de Arames da Armadura de Tração
[5] Falha da válvula de alívio do end fitting (bloqueio) **DO[4,5]	Deformação excessiva na capa externa	Dano Generalizado na capa externa (ruptura , rasgo) *****DO[5]	Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H₂S, CO₂, água do mar)	Corrosão leve dos arames da armadura de tração	Corrosão moderada dos arames da armadura de tração	Corrosão alta dos arames da armadura de tração *****DO[5,8]	Ruptura localizada de arames da armadura de tração *DO[1,8]	Torção excessiva	Ruptura Generalizada de Arames da Armadura de Tração

* $DO_{(pot)}$ [1,8] – Torção excessiva ; Âng. Cat. Inad. ; ** $DO_{(pot)}$ [4,5]- Falha válvula de alívio; *** $DO_{(pot)}$ [8] - Rup.Bend Stif.; **** $DO_{(pot)}$ [1,7,8] – Curvatura excessiva; Kink; ***** $DO_{(pot)}$ [5] – Corrosão arames; ***** $DO_{(pot)}$ [5,8] – Rup. Localiz. Arames

MODO DE FALHA 3 - DESTRAVAMENTO (ou Ruptura Geral) DA BARREIRA DE PRESSÃO (CAMADA ZETA)

MECANISMO DE FALHA - RISER									
Estágio 1 LC = 9 $\xi_{NCI} = 1$	Estágio 2 NC = 8 $\xi_{NCI} = 1,5$	Estágio 3 NC = 7 $\xi_{NCI} = 2$	Estágio 4 NC = 6 $\xi_{NCI} = 2,5$	Estágio 5 NC = 5 $\xi_{NCI} = 3$	Estágio 6 NC = 4 $\xi_{NCI} = 3,5$	Estágio 7 NC = 3 $\xi_{NCI} = 4$	Estágio 8 NC = 2 $\xi_{NCI} = 4,5$	Estágio 9 NC = 1 $\xi_{NCI} = 5$	Estágio 10 (Modo de Falha)
		[1] Dano superficial da capa externa (abrasão, desgaste, corte)	Dano localizado na capa externa (furo , fissura, trinca)	Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H₂S, CO₂, água do mar)	Dano Generalizado na capa externa (ruptura , rasgo)	Corrosão leve da armadura de pressão	Corrosão moderada da armadura de pressão	Corrosão alta da armadura de pressão	Destravamento (ou ruptura geral) da Armadura de Pressão (zeta)
						[2] Ângulo de catenária inadequado	Curvatura excessiva	Gaiola de passarinho (TDP)	Destravamento (ou ruptura geral) da Armadura de Pressão (zeta)
							[3] Ângulo de catenária inadequado	Kink (curvatura excessiva localizada)	Destravamento (ou ruptura geral) da Armadura de Pressão (zeta)
							[4] Ângulo de catenária inadequado	Torção excessiva	Destravamento (ou ruptura geral) da Armadura de Pressão (zeta)

MECANISMO DE FALHA - RISER									
Estágio 1 $LC = 9$ $\xi_{NCI} = 1$	Estágio 2 $NC = 8$ $\xi_{NCI} = 1,5$	Estágio 3 $NC = 7$ $\xi_{NCI} = 2$	Estágio 4 $NC = 6$ $\xi_{NCI} = 2,5$	Estágio 5 $NC = 5$ $\xi_{NCI} = 3$	Estágio 6 $NC = 4$ $\xi_{NCI} = 3,5$	Estágio 7 $NC = 3$ $\xi_{NCI} = 4$	Estágio 8 $NC = 2$ $\xi_{NCI} = 4,5$	Estágio 9 $NC = 1$ $\xi_{NCI} = 5$	Estágio 10 (Modo de Falha)
					[5] Ângulo de catenária inadequado	Curvatura excessiva	Kink (Curvatura excessiva localizada)	Ovalização excessiva	Destravamento (ou ruptura geral) da Armadura de Pressão (zeta)
		[6] Interferência entre dutos (cruzamento)	Dano superficial da capa externa (abrasão, desgaste, corte)	Dano localizado na capa externa (furo, fissura, trinca)	Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H_2S , CO_2 , água do mar)	Corrosão leve da armadura de pressão	Corrosão moderada da armadura de pressão	Corrosão alta da armadura de pressão	Destravamento (ou ruptura geral) da Armadura de Pressão (zeta)
		[7] Ausência de uraduct (TDP)	Dano superficial da capa externa (abrasão, desgaste, corte) - TDP	Dano localizado na capa externa (furo, fissura, trinca)	Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H_2S , CO_2 , água do mar)	Corrosão leve da armadura de pressão	Corrosão moderada da armadura de pressão	Corrosão alta da armadura de pressão	Destravamento (ou ruptura geral) da Armadura de Pressão (zeta)
			[8] Interferência entre dutos (cruzamento)	Dano superficial da capa externa (abrasão, desgaste, corte)	Dano localizado na capa externa (furo, fissura, trinca)	Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H_2S , CO_2 , água do mar)	Dano Generalizado na capa externa (ruptura, rasgo)	Gaiola de passarinho	Destravamento (ou ruptura geral) da Armadura de Pressão (zeta)

MODO DE FALHA 4 - DESLIZAMENTO OU RUPTURA DA ARMADURA DE TRAÇÃO (região de topo - conector)

MECANISMO DE FALHA - RISER									
Estágio1 <i>LC = 9</i> $\xi_{NCI} = 1$	Estágio 2 <i>NC = 8</i> $\xi_{NCI} = 1,5$	Estágio3 <i>NC = 7</i> $\xi_{NCI} = 2$	Estágio 4 <i>NC = 6</i> $\xi_{NCI} = 2,5$	Estágio5 <i>NC = 5</i> $\xi_{NCI} = 3$	Estágio 6 <i>NC = 4</i> $\xi_{NCI} = 3,5$	Estágio 7 <i>NC = 3</i> $\xi_{NCI} = 4$	Estágio 8 <i>NC = 2</i> $\xi_{NCI} = 4,5$	Estágio 9 <i>NC = 1</i> $\xi_{NCI} = 5$	Estágio 10 (Modo de Falha)
					[1] Dano superficial do Bend Stiffener (abrasão, trinca, fissura)	Ruptura do Bend Stiffener • perda de funcionalidade	Curvatura excessiva	Kink (curvatura excessiva localizada) • Região de topo	Deslizamento ou Ruptura da Armadura de Tração (Topo) • Interface Riser / Conector
						[2] Desprendimento do Bend Stiffener * $DO_{(pot)}$ [8]	[2] Desprendimento do Bend Stiffener	Kink (curvatura excessiva localizada) • Região de topo	Deslizamento ou Ruptura da Armadura de Tração (Topo) • Interface Riser / Conector
				* $DO_{(pot)}$ [8]	[3] Perda de flutuador	Ângulo de catenária inadequado	Curvatura excessiva	Kink (curvatura excessiva localizada) • Região de topo	Deslizamento ou Ruptura da Armadura de Tração (Topo) • Interface Riser / Conector
				* $DO_{(pot)}$ [8]	[4] Ruptura do Bend Stiffener (topo) • perda de funcionalidade	Ângulo de catenária inadequado	Curvatura excessiva	Kink (curvatura excessiva localizada) • Região de topo	Deslizamento ou Ruptura da Armadura de Tração (Topo) • Interface Riser / Conector

* $DO_{(pot)}$ [8] – Perda de flutuadores; Desprendimento Bend Stiffener.;

MECANISMO DE FALHA - RISER									
Estágio 1 <i>LC = 9</i> $\xi_{NCI} = 1$	Estágio 2 <i>NC = 8</i> $\xi_{NCI} = 1,5$	Estágio 3 <i>NC = 7</i> $\xi_{NCI} = 2$	Estágio 4 <i>NC = 6</i> $\xi_{NCI} = 2,5$	Estágio 5 <i>NC = 5</i> $\xi_{NCI} = 3$	Estágio 6 <i>NC = 4</i> $\xi_{NCI} = 3,5$	Estágio 7 <i>NC = 3</i> $\xi_{NCI} = 4$	Estágio 8 <i>NC = 2</i> $\xi_{NCI} = 4,5$	Estágio 9 <i>NC = 1</i> $\xi_{NCI} = 5$	Estágio 10 (Modo de Falha)
[5] <i>Interferência entre dutos (cruzamento)</i>	<i>Dano superficial da capa externa (abrasão, desgaste, corte)</i>	<i>Dano localizado na capa externa (furo , fissura, trinca)</i>	<i>Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H₂S, CO₂, água do mar)</i>	<i>Corrosão leve dos arames da armadura de tração</i>	<i>Corrosão moderada dos arames da armadura de tração</i>	<i>Corrosão alta dos arames da armadura de tração</i>	<i>Ruptura localizada de arames armadura tração</i> •interior do end fitting (topo)	<i>Torção excessiva</i>	<i>Deslizamento ou Ruptura da Armadura de Tração (Topo)</i> • Interface Riser / Conector
	[6] <i>Dano superficial da capa externa (abrasão, desgaste, corte)</i>	<i>Dano localizado na capa externa (furo , fissura, trinca)</i>	<i>Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H₂S, CO₂, água do mar)</i>	<i>Corrosão leve dos arames da armadura de tração</i>	<i>Corrosão moderada dos arames da armadura de tração</i>	<i>Corrosão alta dos arames da armadura de tração</i>	<i>Ruptura localizada de arames armadura tração</i> •interior do End fitting (topo)	<i>Torção excessiva</i>	<i>Deslizamento ou Ruptura da Armadura de Tração (Topo)</i> • Interface Riser / Conector
[7] <i>Falha da válvula de alívio do end fitting (bloqueio)</i>	<i>Deformação excessiva da capa externa</i>	<i>Dano Generalizado na capa externa (ruptura , rasgo)</i>	<i>Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H₂S, CO₂)</i>	<i>Corrosão leve dos arames da armadura de tração</i>	<i>Corrosão moderada dos arames da armadura de tração</i>	<i>Corrosão alta dos arames da armadura de tração</i>	<i>Ruptura localizada de arames armadura tração</i> •interior do End fitting (topo)	<i>Torção excessiva</i>	<i>Deslizamento ou Ruptura da Armadura de Tração (Topo)</i> • Interface Riser / Conector

MECANISMO DE FALHA - RISER									
Estágio 1 $LC = 9$ $\xi_{NCI} = 1$	Estágio 2 $NC = 8$ $\xi_{NCI} = 1,5$	Estágio 3 $NC = 7$ $\xi_{NCI} = 2$	Estágio 4 $NC = 6$ $\xi_{NCI} = 2,5$	Estágio 5 $NC = 5$ $\xi_{NCI} = 3$	Estágio 6 $NC = 4$ $\xi_{NCI} = 3,5$	Estágio 7 $NC = 3$ $\xi_{NCI} = 4$	Estágio 8 $NC = 2$ $\xi_{NCI} = 4,5$	Estágio 9 $NC = 1$ $\xi_{NCI} = 5$	Estágio 10 (Modo de Falha)
	[3] Dano superficial da capa externa (abrasão, desgaste, corte)	Dano localizado na capa externa (furo , fissura, trinca)	Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H_2S, CO_2, água do mar)	Dano Generalizado na capa externa (ruptura , rasgo)	Corrosão leve dos arames da armadura de tração	Corrosão moderada dos arames da armadura de tração	Corrosão alta dos arames da armadura de tração	Ruptura localizada de arames armadura tração •interior do End fitting (topo)	Perda de Estanqueidade do Conector (seção de topo)
[4] Falha da válvula de alívio do end fitting (bloqueio)	Deformação excessiva da capa externa	Dano Generalizado na capa externa (ruptura , rasgo)	Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H_2S, CO_2)	Corrosão leve dos arames da armadura de tração	Corrosão moderada dos arames da armadura de tração	Corrosão alta dos arames da armadura de tração	Ruptura localizada de arames armadura tração •interior Endfitting (topo)	Torção excessiva	Perda de Estanqueidade do Conector (seção de topo)
[5] Interferência entre dutos (cruzamento)	Dano superficial da capa externa (abrasão, desgaste, corte)	Dano localizado na capa externa (furo , fissura, trinca)	Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H_2S, CO_2, água do mar)	Corrosão leve dos arames da armadura de tração	Corrosão moderada dos arames da armadura de tração	Corrosão alta dos arames da armadura de tração	Ruptura localizada de arames armadura tração •interior do End fitting (topo)	Torção excessiva	Perda de Estanqueidade do Conector (seção de topo)

MECANISMO DE FALHA - RISER									
Estágio 1 $LC = 9$ $\xi_{NCI} = 1$	Estágio 2 $NC = 8$ $\xi_{NCI} = 1,5$	Estágio 3 $NC = 7$ $\xi_{NCI} = 2$	Estágio 4 $NC = 6$ $\xi_{NCI} = 2,5$	Estágio 5 $NC = 5$ $\xi_{NCI} = 3$	Estágio 6 $NC = 4$ $\xi_{NCI} = 3,5$	Estágio 7 $NC = 3$ $\xi_{NCI} = 4$	Estágio 8 $NC = 2$ $\xi_{NCI} = 4,5$	Estágio 9 $NC = 1$ $\xi_{NCI} = 5$	Estágio 10 (Modo de Falha)
					[6] Perda de flutuadores	Ângulo de catenária inadequado	Curvatura excessiva	Kink (curvatura excessiva localizada) • Região de topo	Perda de Estanqueidade do Conector (seção de topo)
						[7] Ruptura do Bend Stiffener (topo) • perda de funcionalidade	Curvatura excessiva	Kink (curvatura excessiva localizada) • Região de topo	Perda de Estanqueidade do Conector (seção de topo)

MODO DE FALHA 6 - ENTUPIMENTO ou REDUÇÃO DE VAZÃO

MECANISMO DE FALHA - RISER									
Estágio 1 $LC = 9$ $\xi_{NCI} = 1$	Estágio 2 $NC = 8$ $\xi_{NCI} = 1,5$	Estágio 3 $NC = 7$ $\xi_{NCI} = 2$	Estágio 4 $NC = 6$ $\xi_{NCI} = 2,5$	Estágio 5 $NC = 5$ $\xi_{NCI} = 3$	Estágio 6 $NC = 4$ $\xi_{NCI} = 3,5$	Estágio 7 $NC = 3$ $\xi_{NCI} = 4$	Estágio 8 $NC = 2$ $\xi_{NCI} = 4,5$	Estágio 9 $NC = 1$ $\xi_{NCI} = 5$	Estágio 10 (Modo de Falha)
				[1] Interferência entre dutos (cruzamento)	Dano superficial da capa externa (abrasão, desgaste, corte)	Dano localizado na capa externa (furo, fissura, trinca)	Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H_2S , CO_2 , água do mar)	Dano Generalizado na capa externa (ruptura, rasgo)	Entupimento (ou redução de vazão)

MECANISMO DE FALHA - RISER									
Estágio 1 <i>LC</i> = 9 $\xi_{NCI} = 1$	Estágio 2 <i>NC</i> = 8 $\xi_{NCI} = 1,5$	Estágio 3 <i>NC</i> = 7 $\xi_{NCI} = 2$	Estágio 4 <i>NC</i> = 6 $\xi_{NCI} = 2,5$	Estágio 5 <i>NC</i> = 5 $\xi_{NCI} = 3$	Estágio 6 <i>NC</i> = 4 $\xi_{NCI} = 3,5$	Estágio 7 <i>NC</i> = 3 $\xi_{NCI} = 4$	Estágio 8 <i>NC</i> = 2 $\xi_{NCI} = 4,5$	Estágio 9 <i>NC</i> = 1 $\xi_{NCI} = 5$	Estágio 10 (Modo de Falha)
				[2] <i>Perda de flutuadores</i>	<i>Ângulo de catenária inadequado</i>	<i>Curvatura excessiva</i>	<i>Kink (curvatura excessiva localizada)</i>	<i>Ovalização excessiva</i>	<i>Entupimento (ou redução de vazão)</i>
				[3] <i>Ausência de uraduct</i>	<i>Dano superficial da capa externa (abrasão, desgaste, corte)</i>	<i>Dano localizado na capa externa (furo , fissura, trinca)</i>	<i>Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H₂S, CO₂, água do mar)</i>	<i>Dano Generalizado na capa externa (ruptura , rasgo)</i>	<i>Entupimento (ou redução de vazão)</i>
					[4] <i>Torção excessiva</i>	<i>Gaiola de passarinho</i>	<i>Dano Generalizado na capa externa (ruptura , rasgo)</i>	<i>Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H₂S, CO₂, água do mar)</i>	<i>Entupimento (ou redução de vazão)</i>
					[5] <i>Curvatura excessiva</i>	<i>Gaiola de passarinho</i>	<i>Dano Generalizado na capa externa (ruptura , rasgo)</i>	<i>Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H₂S, CO₂, água do mar)</i>	<i>Entupimento (ou redução de vazão)</i>

MODO DE FALHA 7- RUPTURA DA BARREIRA POLIMÉRICA DE VEDAÇÃO (VAZAMENTO / PERDA DE ESTANQUEIDADE)

MECANISMO DE FALHA - RISER									
Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5	Estágio 6	Estágio 7	Estágio 8	Estágio 9	Estágio 10 (Modo de Falha)
$LC = 9$ $\xi_{NCI} = 1$	$NC = 8$ $\xi_{NCI} = 1,5$	$NC = 7$ $\xi_{NCI} = 2$	$NC = 6$ $\xi_{NCI} = 2,5$	$NC = 5$ $\xi_{NCI} = 3$	$NC = 4$ $\xi_{NCI} = 3,5$	$NC = 3$ $\xi_{NCI} = 4$	$NC = 2$ $\xi_{NCI} = 4,5$	$NC = 1$ $\xi_{NCI} = 5$	
						$** DO_{(pot)}$ [2,4,5]	[1] Trinca localizada na barreira de vedação	Trinca generalizada na barreira de vedação (fragilização)	Ruptura da Barreira de Vedação (vazamento)
					[2] Excesso de curvatura $** DO_{(pot)}$ [1,3,5,8]	Destravamento (ou ruptura) localizado da armadura de pressão $** DO_{(pot)}$ [4,5]	Extrusão do polímero da barreira de vedação nos interstícios da armadura de pressão $*DO$ [2,4,5]	Fissura (ou furo) da barreira de vedação	Ruptura da Barreira de Vedação (vazamento)
							[3] Ovalização excessiva da carcaça interna $** DO_{(pot)}$ [2,4,5] + Obs ⁽ⁱ⁾	Fissura (ou furo) da barreira de vedação	Ruptura da Barreira de Vedação (vazamento)

* $DO_{(pot)}$ [2,4,5] – Trinca localizada ou fissura da Barreira de vedação; ** $DO_{(pot)}$ [1,3,5,8] – Destravamento localizado da armadura pressão (zeta).

Obs ⁽ⁱ⁾ : Os modos de falhas “ Destravamento ou Colapso da Carcaça interna”, podem provocar simultaneamente a perda total de integridade da mesma, fissuras, trincas ou ruptura da barreira de vedação. **Obs** ⁽ⁱⁱ⁾ : Alguns dados operacionais potencializadores foram indicados nos mecanismos de falhas para alguns modos de falha. Naturalmente o leitor pode estender a alocação dos $DO_{(pot)}$ de $NCI_{(CRÍTICAS)}$ nos estágios dos demais mecanismos de falhas de risers e flowlines (Anexo 2).

ANEXO 2

Mecanismo Falhas Potenciais de Duto Flexível Submarino para aplicação Riser e/ou Flowline

2ª Categoria : FLOWLINE (Aplicação Estática)

MODO DE FALHA 1 - FALHA DA CARÇAÇA INTERNA (Colapso ou Destravamento)

MECANISMO DE FALHA - FLOWLINE							
Estágio 1 <i>LC = 7</i> $\xi_{NCI} = 1$	Estágio 2 <i>NC = 6</i> $\xi_{NCI} = 1,7$	Estágio 3 <i>NC = 5</i> $\xi_{NCI} = 2,4$	Estágio 4 <i>NC = 4</i> $\xi_{NCI} = 3$	Estágio 5 <i>NC = 3</i> $\xi_{NCI} = 3,7$	Estágio 6 <i>NC = 2</i> $\xi_{NCI} = 4,4$	Estágio 7 <i>NC = 1</i> $\xi_{NCI} = 5$	Estágio 8 (Modo de Falha)
				[1] Vão livre excessivo	Curvatura excessiva	Kink (curvatura localizada excessiva)	<i>Falha da Carcaça Interna (Colapso ou Destravamento)</i>
			[2] Torção excessiva	Loop do Tramo	Curvatura excessiva	Kink (curvatura localizada excessiva)	<i>Falha da Carcaça Interna (Colapso ou Destravamento)</i>
	[3] Dano superficial da capa externa (abrasão, desgaste, corte)	Dano localizado na capa externa (furo , fissura, trinca)	Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H ₂ S, CO ₂ , água do mar)	Dano Generalizado na capa externa (ruptura , rasgo)	Torção excessiva	Gaiola de passarinho	<i>Falha da Carcaça Interna (Colapso ou Destravamento)</i>

MECANISMO DE FALHA - FLOWLINE							
Estágio 1 $LC = 7$ $\xi_{NCI} = 1$	Estágio 2 $NC = 6$ $\xi_{NCI} = 1,7$	Estágio 3 $NC = 5$ $\xi_{NCI} = 2,4$	Estágio 4 $NC = 4$ $\xi_{NCI} = 3$	Estágio 5 $NC = 3$ $\xi_{NCI} = 3,7$	Estágio 6 $NC = 2$ $\xi_{NCI} = 4,4$	Estágio 7 $NC = 1$ $\xi_{NCI} = 5$	Estágio 8 (Modo de Falha)
			[4] Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H ₂ S, CO ₂)	Corrosão leve da carcaça interna	Corrosão moderada da carcaça interna	Corrosão alta da carcaça interna	Falha da Carcaça Interna (Colapso ou Destravamento)
						[5] Ovalização excessiva	Falha da Carcaça Interna (Colapso ou Destravamento)

MODO DE FALHA 2 - DESTRAVAMENTO (ou Ruptura Geral) DA ARMADURA DE PRESSÃO (ZETA)

MECANISMO DE FALHA - FLOWLINE							
Estágio 1 $LC = 7$ $\xi_{NCI} = 1$	Estágio 2 $NC = 6$ $\xi_{NCI} = 1,7$	Estágio 3 $NC = 5$ $\xi_{NCI} = 2,4$	Estágio 4 $NC = 4$ $\xi_{NCI} = 3$	Estágio 5 $NC = 3$ $\xi_{NCI} = 3,7$	Estágio 6 $NC = 2$ $\xi_{NCI} = 4,4$	Estágio 7 $NC = 1$ $\xi_{NCI} = 5$	Estágio 8 (Modo de Falha)
			[1] Vão livre excessivo	Curvatura excessiva	Kink (curvatura localizada excessiva)	Ovalização excessiva	Destravamento (ou ruptura geral) da Armadura de Pressão (zeta)
[2] Dano superficial da capa externa (abrasão, desgaste, corte)	Dano localizado na capa externa (furo, fissura, trinca)	Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H ₂ S, CO ₂ , água do mar)	Dano Generalizado na capa externa (ruptura, rasgo)	Corrosão leve da armadura de pressão	Corrosão moderada da armadura de pressão	Corrosão alta da armadura de pressão	Destravamento (ou ruptura geral) da Armadura de Pressão (zeta)

MECANISMO DE FALHA - FLOWLINE							
Estágio 1 $LC = 7$ $\xi_{NCI} = 1$	Estágio 2 $NC = 6$ $\xi_{NCI} = 1,7$	Estágio 3 $NC = 5$ $\xi_{NCI} = 2,4$	Estágio 4 $NC = 4$ $\xi_{NCI} = 3$	Estágio 5 $NC = 3$ $\xi_{NCI} = 3,7$	Estágio 6 $NC = 2$ $\xi_{NCI} = 4,4$	Estágio 7 $NC = 1$ $\xi_{NCI} = 5$	Estágio 8 (Modo de Falha)
			[3] Loop do Tramo	Curvatura excessiva	Kink (curvatura localizada excessiva)	Gaiola de passarinho	<i>Destravamento (ou ruptura geral) da Armadura de Pressão (zeta)</i>
			[4] Vão livre excessivo	Curvatura excessiva	Kink (curvatura localizada excessiva)	Torção excessiva	<i>Destravamento (ou ruptura geral) da Armadura de Pressão (zeta)</i>
[5] Interferência entre dutos (cruzamento)	Dano superficial da capa externa (abrasão, desgaste, corte)	Dano localizado na capa externa (furo, fissura, trinca)	Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H_2S , CO_2 , água do mar)	Corrosão leve da armadura de pressão	Corrosão moderada da armadura de pressão	Corrosão alta da armadura de pressão	<i>Destravamento (ou ruptura geral) da Armadura de Pressão (zeta)</i>
	[6] Interferência entre dutos (cruzamento)	Dano superficial da capa externa (abrasão, desgaste, corte)	Dano localizado na capa externa (furo, fissura, trinca)	Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H_2S , CO_2 , água do mar)	Dano Generalizado na capa externa (ruptura, rasgo)	Gaiola de passarinho	<i>Destravamento (ou ruptura geral) da Armadura de Pressão (zeta)</i>

MODO DE FALHA 3 - ENTUPIMENTO OU REDUÇÃO DE VAZÃO

MECANISMO DE FALHA - FLOWLINE							
Estágio 1 <i>LC = 7</i> $\xi_{NCI} = 1$	Estágio 2 <i>NC = 6</i> $\xi_{NCI} = 1,7$	Estágio 3 <i>NC = 5</i> $\xi_{NCI} = 2,4$	Estágio 4 <i>NC = 4</i> $\xi_{NCI} = 3$	Estágio 5 <i>NC = 3</i> $\xi_{NCI} = 3,7$	Estágio 6 <i>NC = 2</i> $\xi_{NCI} = 4,4$	Estágio 7 <i>NC = 1</i> $\xi_{NCI} = 5$	Estágio 8 (Modo de Falha)
		[1] Interferência entre dutos (cruzamento) e/ou entre o duto e o solo marinho abrasivo ou corais	Dano superficial da capa externa (abrasão, desgaste, corte)	Dano localizado na capa externa (furo , fissura, trinca)	Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H ₂ S, CO ₂ , água do mar)	Dano Generalizado na capa externa (ruptura , rasgo)	Entupimento (ou redução de vazão)
			[2] Torção excessiva	Gaiola de passarinho	Dano Generalizado na capa externa (ruptura , rasgo)	Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H ₂ S, CO ₂ , água do mar)	Entupimento (ou redução de vazão)
			[3] Curvatura excessiva	Gaiola de passarinho	Dano Generalizado na capa externa (ruptura , rasgo)	Espaço anular com presença de agentes corrosivos (H ₂ S, CO ₂ , água do mar)	Entupimento (ou redução de vazão)
			[4] Vão livre excessivo	Curvatura excessiva	Kink (curvatura localizada excessiva)	Ovalização excessiva	Entupimento (ou redução de vazão)
			[5] Loop do Tramo	Curvatura excessiva	Kink (curvatura localizada excessiva)	Ovalização excessiva	Entupimento (ou redução de vazão)

MODO DE FALHA 4 - RUPTURA DA BARREIRA DE VEDAÇÃO (VAZAMENTO / PERDA DE ESTANQUEIDADE)

MECANISMO DE FALHA - FLOWLINE							
Estágio 1 <i>LC = 7</i> $\xi_{NCI} = 1$	Estágio 2 <i>NC = 6</i> $\xi_{NCI} = 1,7$	Estágio 3 <i>NC = 5</i> $\xi_{NCI} = 2,4$	Estágio 4 <i>NC = 4</i> $\xi_{NCI} = 3$	Estágio 5 <i>NC = 3</i> $\xi_{NCI} = 3,7$	Estágio 6 <i>NC = 2</i> $\xi_{NCI} = 4,4$	Estágio 7 <i>NC = 1</i> $\xi_{NCI} = 5$	Estágio 8 (Modo de Falha)
					[1] Trinca localizada na barreira de vedação	Trinca generalizada na barreira de vedação (fragilização)	<i>Ruptura da Barreira de Vedação (vazamento)</i>
					[2] Trinca localizada na barreira de vedação	Trinca generalizada na barreira de vedação (fragilização)	<i>Ruptura da Barreira de Vedação (vazamento)</i>
			[3] Excesso de curvatura	Destravamento localizado da armadura de pressão (zeta)	Extrusão do polímero da barreira de vedação nos interstícios da armadura de pressão	Fissura (ou furo) da barreira de vedação	<i>Ruptura da Barreira de Vedação (vazamento)</i>
					[4] Ovalização excessiva Carcaça Interna	Fissura (ou furo) da barreira de vedação	<i>Ruptura da Barreira de Vedação (vazamento)</i>

ANEXO 3

Pesquisa Operacional **PROGRAMAÇÃO LINEAR** *A Base da DEA*

A Análise de Envoltória de Dados (DEA) baseia-se em problemas de programação linear (PPL) para determinar a eficiência de Unidades produtivas, avaliando o seu desempenho. Problemas de programa linear correspondem a uma sub-classe de problemas em pesquisa operacional nos quais a modelagem é inteiramente expressa em termos de equações lineares (LISBOA, 2002)

A estrutura de um modelo de Programação linear contém as seguintes características, segundo LINS (2006a):

- (i) **Variáveis de Decisão:** x_1, x_2, \dots, x_n (valores reais maiores ou iguais a zero) ;
- (ii) **Função Objetivo Linear de Variáveis de Decisão :** a função $c_1x_1+c_2x_2+\dots+c_nx_n$ a ser maximizada ou minimizada;
- (iii) **Restrições:** quando valores numéricos são designados para as variáveis de decisão x_1, x_2, \dots, x_n para influenciar a função objetivo, estes valores também influenciam as restrições. Os modelos requerem que os valores numéricos sejam tais que não violem nenhuma restrição. São expressas como equações (=) ou inequações (\leq, \geq) lineares em termos das variáveis de decisão definidas no passo anterior;
- (iv) **Parâmetros:** os coeficientes na função objetivo são parâmetros. Os parâmetros são entidades cujo valor permanece fixo durante a resolução do problema, entretanto pode ser mudado depois.
- (v) **Constantes:** os coeficientes $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n}$ representam para cada variável de decisão, que refletem uma taxa constante de utilização do recurso.

Um PPL geral com m restrições e n variáveis é dado pela seguinte formulação (BAZARAA et al, 1990, LINS, 2006) :

$$\text{Maximizar (ou minimizar) } \quad W = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (1)$$

$$\text{Max / Min} \left(\sum_{n=1}^N c_n \cdot x_n \right)$$

Sujeito as restrições:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1 \text{ (ou } \geq, \text{ ou } =)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2 \text{ (ou } \geq, \text{ ou } =)$$

...

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m \text{ (ou } \geq, \text{ ou } =)$$

$$\sum_{n=1}^N a_{mn} \cdot x_n = b_m, \text{ (ou } \leq, \text{ ou } \geq), \forall m \in (1, \dots, M)$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0 \quad \forall n \in (1, \dots, N)$$

$$b_1, b_2, \dots, b_m \geq 0, \quad \forall m \in (1, \dots, M) \quad (2)$$

Onde,

n – número de incógnitas ;

m – número de equações (ou inequações) do sistema ;

x_n – valor da variável de decisão (n);

c_n – contribuição da variável de decisão x_n , por unidade, para a função objetivo;

F – função objetivo a ser maximizada ou minimizada;

a_{mn} – quantidade do recurso (m) gasta por unidade da variável de decisão x_n (constante) ;

b_m – disponibilidade do recurso (m), significa uma constante ;

No caso do formato padrão do PPL, todas as restrições são expressas como equações, todas as variáveis são não-negativas e a constante no lado direito das restrições é não-negativa. O formato padrão de um Problema de Programação Linear (PPL) pode ser escrito em forma mais compacta tipo matricial:

$$Max/Min : W = c.x$$

Sujeito a restrição:

$$\begin{aligned} A.x &= b \\ x &\geq 0 \\ b &\geq 0 \end{aligned}$$

(3)

Onde,

A é uma matriz de dimensão ($m \times n$), **x** é um vetor ($n \times 1$), **b** é um vetor ($m \times 1$) e **c** é um vetor transposto ($1 \times n$). A matriz **A** é normalmente denominada matriz das restrições ou matriz dos coeficientes. O **x** é o vetor de decisão, já que contém a lista das variáveis de decisão consideradas no problema. O vetor **b** é conhecido como lado direito das restrições ou vetor das necessidades, que indica a disponibilidade de recursos associados à cada restrição. Por fim, o vetor **c** é conhecido como vetor de custos do problema. Ele contém os coeficientes de custo que compõem a função objetivo.

Representação Matricial de um PPL Padrão acima :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{14} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & \dots & a_{24} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & \dots & a_{m4} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}_{(m \times n)} \quad X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix}_{(n \times 1)} \quad b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_m \end{bmatrix}_{(m \times 1)}$$

$$A_{(m \times n)} X_{(n \times 1)} = b_{(m \times 1)} \quad (4)$$

Anexo 4

Cálculo PPL – Software SIAD

Algoritmo Simplex

1 – Objetivo

Consiste no método de resolução matricial de problemas de programação linear, buscando a solução ótima apenas entre as soluções básicas admissíveis. O método ocorre através de um processo iterativo de modo a aumentar o valor da função objetivo.

LISBOA (2002) e LINS (2006a) define o simplex como um algoritmo que utiliza um ferramental baseado na Álgebra Linear para determinar, por um método iterativo, a solução ótima de um PPL.

O algoritmo Simplex foi estabelecido por George Dantzig em 1948 constituindo um dos métodos mais usados na resolução de PPLs . Resolvendo repetidas vezes o problema (iteração) , encontra sempre uma solução “melhor” do que a anterior, até chegar a uma solução ótima das equações que otimiza o valor da função objetivo maximizada ou minimizada. Uma solução ótima é atingida após um certo número de iterações, não maior do que o número de restrições ou o número de variáveis .

Desta forma, os PPLs do modelo DEA Risco aqui proposto serão resolvidos pelo Método Simplex, comum em programação matemática.

O Simplex na forma de PPL padrão , pode ser resumido em :

$$\begin{aligned} \text{F.O :} \quad & \text{Max}(W = \sum_{n=1}^N c_n \cdot x_n) \\ \text{Restrições :} \quad & A \cdot x = b \quad , \quad (c_{1 \times n}, A_{m \times n}, b_{m \times 1}, x_{n \times 1}) \\ & x_n \geq 0, \forall i \\ & (b \geq 0) \end{aligned} \tag{5}$$

O PPL acima revela-se mais adequado à resolução de PL de grande dimensão (muitas variáveis e/ou muitas restrições)

2 – Metodologia Clássica Simplex (Problemas de Maximização)

1º) Passo: Introduzir as variáveis de folga : uma para cada desigualdade;

2º) Passo: Montar um quadro para os cálculos, colocando os coeficientes de todas as variáveis com os respectivos sinais e, na última linha, incluir os coeficientes da função objetivo transformada.

3º) Passo: Indicar uma solução básica admissível inicial ($\bar{\theta}$), usualmente atribuindo valor zero às variáveis originais e achando valores positivos para as variáveis de folga. Se os coeficientes da função objetivo ($c_j \geq 0$) forem positivos, termine, $\bar{\theta}$ é solução ótima. Caso contrário faça nova iteração, escolhendo a coluna da variável não básica x_n que vai entrar na base.

4º) Passo: Iteração – passar a uma solução básica admissível melhor;

Definir variável que entra na base (variável não-básica) onde irá provocar acréscimo mais rápido na função objetivo num problema de maximização. Escolher a variável não básica que oferece, na última linha, a maior contribuição para o aumento da função objetivo, ou seja, tem o coeficiente de menor valor negativo ($c_j < 0$). Se todas as variáveis que estão fora da base tiverem coeficientes nulos ou positivos nesta linha, a solução atual é ótima. Onde :

$$c_n = \min\{c_j, j \in n, c_j < 0\}$$

5º) Passo: Definir variável que deve sair da base mediante dois procedimentos;

- (i) Dividir todos os elementos independentes (última coluna) pelos correspondentes elementos positivos da coluna da variável que vai entrar na base, se todos os coeficientes forem negativos, a solução é ilimitada e o processo deve parar.
- (ii) A linha que corresponder o menor quociente é a linha pivot. O menor quociente indica a equação cuja respectiva variável básica deverá ser anulada, tornando-se variável não-básica. Assim,

$$\min \text{Quociente} = \min\left(\frac{b_m}{a_{mn}}\right), (a_{mn} > 0)$$

6º) Passo: Atualizar a tabulação aplicando o Método de Eliminação de Gauss-Jordan em todas as linhas da matriz, transformando o quadro de cálculos de forma a encontrar a nova solução básica.

**** Método de Gauss- Jordan**

É proveniente da derivação de um sistema específico de equações lineares que tenham a mesma solução que o sistema original. O método transforma o antigo sistema em uma matriz identidade, o qual é obtido através de combinações lineares das equações originais. São sugeridas as seguintes transformações lineares: troca de linhas, multiplicação da linha por um escalar e soma de uma linha. Abaixo são apresentadas as notações necessárias aplicadas no Método Simplex:

$L_n \leftrightarrow L_m$: troca das linhas n e m ;

$L_n \leftarrow kL_n$: multiplicação da linha n pelo escalar k ;

$L_n \leftarrow L_n + kL_m$: soma da linha m multiplicada pelo escalar k à linha n .

Exemplo arbitrário:

$$\begin{cases} 4y_1 + 8.y_2 = 160 \\ 6y_1 + 4y_2 = 120 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 1.y_1 + 0y_2 = 10 \\ 0y_1 + 1y_2 = 15 \end{cases} \rightarrow \text{Solução : } \begin{cases} y_1 = 10 \\ y_2 = 15 \end{cases}$$

Onde foram adotados os seguintes passos:

- 1) $L_1 \leftarrow L_1 / 4$ (divisão da linha 1 por 4) – transformação do coeficiente de y_1 na equação 1 para 1.
- 2) $L_2 \leftarrow L_2 - 6L_1$ (subtração da linha 2 pela linha 1 multiplicada por 6) – transformação do coeficiente de y_1 na equação 2 para 0.
- 3) $L_2 \leftarrow (-L_2 / 8)$ (divisão da linha 2 por (-8)) – transformação do coeficiente de y_2 na equação 2 para 1.
- 4) $L_1 \leftarrow L_1 - 2L_2$ (subtração da linha 1 pela linha 2 multiplicada por -2) – transformação do coeficiente de y_2 na equação 1 para 0.

7º) Passo : Verificar se a solução básica admissível é ótima;

8º) Passo: Retornar ao passo 4 para iniciar outra iteração. Parar quando não existir nenhuma solução básica admissível adjacente melhor que a solução inicial.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)