

1

INTRODUÇÃO

1.1.- SISTEMAS DE TUBULAÇÕES DE TRANSMISSÃO

Os sistemas de tubulações utilizados para transportar petróleo, gás ou derivados possuem diferentes diâmetros, comprimentos, espessura, pressão de operação. Estes sistemas podem ser classificados como de recopilação, transmissão e distribuição. Nesta tese se estudará o Risco associado aos sistemas de tubulação de transmissão. Estes dutos transportam o fluido dos pontos centrais de armazenamento para as refinarias, ou outros terminais, por meio de tubulações de grande diâmetro, através de longas distâncias, como por exemplo, o duto de 3800 km (40 polegadas de diâmetro) que está sendo construído para transportar gás do oeste ao leste da China. Outro exemplo é o gasoduto Brasil/Bolívia, que transporta gás de Santa Cruz de la Sierra (Bolívia) a São Paulo (Brasil). Este gasoduto que tem comprimento de 2.000 km e possui um diâmetro de 32 polegadas. O gasoduto Rio/Juiz de Fora/Belo Horizonte que permite a chegada do gás natural produzido na bacia de Campos, ao estado de Minas Gerais e tem um diâmetro de 18 polegadas.

Os dutos de transmissão operam sob altas pressões e podem ter quilômetros de comprimento atravessando rodovias, campos, áreas reservadas e cidades. Isto torna seu controle, para evitar mau funcionamento, uma tarefa bastante complexa. Apesar de existirem sistemas de controle a monitoração sofisticada e ainda que o transporte por dutos tenha uma baixa taxa de acidentes se comparados com outros meios de transporte, acidentes tem chamado a atenção pública pelas conseqüências que estes provocam, tais como mortes de pessoas, impactos ambientais, perdas econômicas, etc. É extremamente importante que as operadoras das tubulações tenham uma boa compreensão das causas e as possíveis conseqüências dos acidentes com a finalidade de diminuir seu Risco.

1.2

DEFINIÇÃO DE RISCO EM SISTEMAS DE DUTOS DE TRANSMISSÃO

Geralmente o Risco pode ser classificado como puro ou especulativo [1]. No primeiro só existe a possibilidade de perda, enquanto no segundo, a de ganhar ou perder. Por exemplo, acidentes em dutos expõem a população ao Risco puro, enquanto, políticas econômicas a expõem ao Risco especulativo. O Risco pode ser expresso também, como individual ou social. No primeiro, afeta somente a uma pessoa, por exemplo, acidente de automóvel, já no segundo afeta a um grupo de pessoas, por exemplo, um terremoto no Japão. Casos de acidentes em sistemas de tubulações que atravessam cidades povoadas, fazendas particulares, rodovias, etc., incluem os Riscos individuais e sociais. A API (American Petroleum Institute) em [3] define o Risco de sistemas de dutos de transmissão como uma função da avaliação da probabilidade de ocorrer um evento não desejado, por exemplo, devido ao dano por corrosão severa, e de suas conseqüências.

Para evitar acidentes em dutos, diferentes mecanismos e causas de danos devem ser analisados antes de se decidir que ações devem ser realizadas com o objetivo de diminuir o Risco de ocorrerem estes nos duto. Muhlbauer [2] identificou quatro tipos de mecanismos e causas de danos que podem levar um duto a perder sua funcionalidade: dano provocado por terceiros, corrosão, projeto e por operações incorretas.

1.3

AVALIAÇÃO QUANTITATIVA E QUALITATIVA DO RISCO

Dependendo da existência de uma base de dados, a avaliação do Risco pode ser realizada mediante métodos quantitativos ou qualitativos [4,5]. Nas referências [6,7] se mencionam diferentes bases de dados de incidentes com tubulações de transmissão (ONSHORE) tais como: European Gás Incident Group (EGIG), US Department of Transportation (US DOT), The Oil Companies European Organisation for

Environment, Health and Safety (CONCAWE), and Russian Scientific/Research Institute for natural Gás and Gás Technology (VNIIGAS), etc.

Em uma avaliação de Risco quantitativo, o conceito de probabilidade, que representa a o conceito de probabilidade de ocorrer um evento não desejado, é avaliado através da informação disponível de uma base de dados, além, de um modelo analítico para quantificá-la. No entanto, na maioria dos casos, obter o modelo analítico torna-se complicado devido à complexidade na modelagem, as incertezas existentes, a falta de conhecimento, etc..

No caso de uma análise de Risco qualitativo, a medição da probabilidade é avaliada de forma subjetiva, por exemplo, quando se usa para avaliar a opinião de um especialista. Neste caso, o especialista, para reduzir a incerteza da sua avaliação, consultará os operadores, revisará a documentação disponível e a literatura sobre casos similares, etc. A avaliação do Risco qualitativo requer pouca informação se comparada à forma quantitativa. Além disso, o tempo investido para obter os resultados é muito menor. Geralmente a avaliação do Risco qualitativo é considerada como Risco relativo. Isto significa que sua avaliação somente tem sentido se comparada com outras avaliações feitas de maneira similar.

Com os resultados da avaliação do Risco qualitativo pode-se ordenar os eventos, para conhecer-se o evento mais crítico, e então, realiza-se para este evento uma avaliação de Risco quantitativo.

1.4

TEORIA DE LÓGICA FUZZY NA AVALIAÇÃO DE RISCO QUALITATIVO

O uso da teoria da lógica fuzzy tem dado bons resultados na modelagem de Risco qualitativo [8, 9, 10, 11, 12, 13]. Esta teoria manipula a incerteza e representa aspectos qualitativos por meios de palavras ou sentenças em uma linguagem natural, como por exemplo, probabilidade de falha *alta*, consequência *baixa*, Risco *médio*, corrosão *baixa*, etc.

Métodos fuzzy são especialmente eficientes em solucionar problemas de Risco através dos conhecimentos e experiência dos especialistas. De fato, a teoria da lógica fuzzy foi originalmente formulada para resolver problemas formulados em valores lingüísticos, na qual, a perda de dados pode ser substituída por avaliações em quantidades subjetivas ou quando o conhecimento do especialista, expressado num raciocínio aproximado, é a única fonte de conhecimento.

A lógica fuzzy pode ser aplicada também na avaliação do *nível* de Risco qualitativo baseado em certos princípios de classificação. Nos métodos convencionais de classificação, os especialistas introduzem subclasses objetivando fazer uma classificação mais detalhada. No entanto, as aproximações tradicionais não podem manipular valores na transição de uma classe a outra classe, a qual, esta transição por natureza deveria ser gradual, enquanto que a lógica fuzzy realiza esta transição de modo fácil, efetivo e elegante [9].

1.5

NECESSIDADE DA COMPREENSÃO INTEGRAL DO PROBLEMA DE AVALIAÇÃO DO RISCO EM DUTOS PARA TRANSMISSÃO DE PETRÓLEO, GÁS OU DERIVADOS

A percepção do Risco nas operações dos sistemas de dutos é afetada por fatores qualitativos (nível de população, tipo do meio ambiente, sistemas de segurança, etc.) e quantitativos (tais como, pressão de operação, taxa de corrosão, etc.). Para avaliar os fatores qualitativos não existem procedimentos objetivos, razão pela qual muitas vezes esta análise é eliminada. Neste caso, a avaliação do Risco que considere somente os fatores quantitativos é incompleta por que não representa o Risco real. Os fatores qualitativos são também importantes e eles devem ser considerados na análise do Risco. Neste cenário, as técnicas Bayesiana, lógica fuzzy e Dempster – Shafer [14] podem ser utilizadas para avaliar a parte subjetiva do Risco.

Na teoria Bayesiana, a avaliação dos fatores qualitativos é realizada através de duas avaliações, uma subjetiva e outra objetiva. A primeira, denominada de APRIORI, é obtida pela avaliação de um especialista, enquanto que a segunda, é avaliada de uma base de dados. Na teoria de lógica fuzzy os fatores qualitativos podem ser representados por duas maneiras. A primeira através de termos lingüísticos, como por exemplo, alto, baixo, médio, etc., e a segunda, por meio dos números fuzzy que são uma generalização dos números CRISP¹. A teoria de DEMPSTER – SHAFER [14], também conhecida como a teoria da evidência, é uma generalização da teoria de probabilidade. Esta teoria representa a probabilidade de um evento, $P(H)$, mediante o intervalo $L(H) - U(H)$, tal que $L(H) < P(H) < U(H)$ e $L(H), U(H) \in [0-1]$. Apesar de saber o valor exato de $P(H)$, os valores $L(H)$ e $U(H)$ representam o valor mínimo e máximo de $P(H)$. Quando $L(H)=U(H)$, a teoria da evidência reduz-se à teoria Bayesiana.

Na presente tese se aplicará a teoria de lógica fuzzy na avaliação do Risco em sistemas tubulação para transmissão de petróleo, gás ou derivados. Esta avaliação será feita considerando como sendo qualitativos todos os fatores que influenciam no Risco.

Considerar os fatores de natureza quantitativa como sendo qualitativos, traz a vantagem de poder-se realizar uma avaliação aproximada de seu valor o que permite uma avaliação rápida.

1.6

IMPORTÂNCIA DA AVALIAÇÃO DO RISCO NA ATIVIDADE DUTOVIARIA

Os resultados de uma avaliação do Risco permitem as operadoras dos dutos e a sociedade tomar diversas decisões.

As empresas operadoras dos dutos realizam a programação de ações preventivas objetivando diminuir o Risco. Em alguns casos, a programação de ações preventivas

¹ Um número CRISP é representado mediante a forma determinística desde que seu valor seja conhecido em forma exata, não existindo dúvida de seu valor.

é baseada somente nos resultados do Risco [56]. Entretanto, em outros, pode ser realizada com base nos resultados de outras avaliações, por exemplo, da vida residual [64], grau de dano no duto [54], de uma análise de custo benefício [55] ou da pressão de admissível [59], etc. Contudo, a programação das ações preventivas nos sistemas de tubulações sempre requer do conhecimento do Risco, com tal objetivo, diversas técnicas podem ser utilizadas para determinar o valor real do Risco, umas mais simples que outras. Por exemplo, Abbassi [31] faz uma análise de vantagens e desvantagens das seguintes técnicas na avaliação do Risco: Sistema de posição, Sistema de Índices, Árvore de falha, Modos de falhas e análise de efeito (FMEA), Estudo de operacionalidade e perigo (HAZOP), Revista de Lista - CHECK -LIST. Com base nestas técnicas, diversos softwares comerciais encontram-se disponíveis, por exemplo, a PIPESAFE, TRANSPIRE, RISKWISE for Pipelines, IAP da Bass-Trigon, PipeView Risk, ORCA, Dinamic Risk, etc.

Já no caso da sociedade, os resultados do Risco permitem alertar à população sobre os perigos potenciais que os sistemas de tubulações podem ocasionar se ocorrer um evento não desejado.

Com isto, é tarefa dos organismos reguladores da atividade dutoviária manter um controle permanente “obrigando” as operadoras dos dutos a realizar o máximo esforço, tal que, a sociedade não seja afetada no caso de ocorrer um acidente.

1.7

ESTADO DA ARTE

O estado da arte de como a lógica fuzzy, Risco e dutos de transmissão são relacionados serão apresentadas a seguir:

Claudio de Brito Garcia [12] apresenta conceitos básicos da teoria da lógica fuzzy e a metodologia de análise preliminar de perigos. Estes dois conceitos foram utilizados para gerar um modelo usado para auxiliar as equipes de análise a classificar os

cenários de acidentes. As aplicações neste trabalho são realizadas no cenário das indústrias químicas e petroquímicas. Mario Pezzi Filho [15] comenta que os procedimentos das plantas petroquímicas têm limitações quando se tenta aplicar nos sistemas de tubulação. Pezzi menciona que a norma API 581 (dirigidos a equipamentos de plantas petroquímicas) não aborda alguns modos de falha que ocorrem em dutos. Isto ocorre devido às diferenças fundamentais entre o modo de instalação e operação de um duto com respeito a um equipamento utilizado em plantas petroquímicas. Outra norma que avaliar o Risco de sistemas de tubulação é a API STD 1160 [3]. Nela recomenda-se um procedimento que as operadoras dos sistemas de tubulação deveriam seguir para reduzir o número de acidentes e os efeitos por eles produzidos em áreas denominadas de alta conseqüência. Esta norma menciona a existência de diferentes métodos para avaliar o Risco dos sistemas de tubulações, tais como o HAZOP (Hazard and Operability Study), QRA(Quantitative Risk Assessment), Matriz de Risco, Árvore de Falhas, Cenários Possíveis, Sistemas de Pontuação, etc. Todos esses métodos deverem responder a três perguntas básicas: Quais são os cenários perigosos? Qual é a probabilidade de um deles ocorrer? Quais são as conseqüências caso ocorrer o cenário não desejado? Baseado nestas perguntas, **W. Kent Muhlbauer** [2] propôs um método que avalie o Risco em sistemas de tubulações.

Para responder a primeira pergunta, Muhlbauer considera quatro cenários possíveis de falhas: por corrosão, projeto, operações incorretas e por terceiros. Para responder à segunda pergunta, Muhlbauer avalia cada um destes cenários através de sistemas de pontuações. Os valores da pontuações variam de **0** até **100**, sendo que **0** representa uma probabilidade alta de ocorrer a falha e **100** uma probabilidade baixa. Para a última pergunta, o método de Muhlbauer avalia o fator impacto de vazamento. Esta análise leva em consideração as características do produto que está sendo transportado, as condições de operação e a localização do trecho. Contudo, o método de Muhlbauer é considerado como subjetivo, já que os valores dados às pontuações levam em consideração a avaliação subjetiva do especialista.

G. Spadoni et. al. [16] descrevem um procedimento numérico para avaliar o Risco individual e social derivados do transporte de substâncias perigosas (incluem-se aí os sistemas de transporte por dutos). Este trabalho menciona que o método quantitativo para avaliar o Risco requer um tempo computacional maior se comparado com o método qualitativo, por isso, S. Bonvinivi, et al. [8] introduziram a teoria de lógica fuzzy no trabalho de G. Spadoni. Nesse trabalho os números fuzzy são aplicados para avaliar o Risco de transportar substâncias perigosas objetivando introduzir as incertezas no resultado do Risco individual e social. Para isso, as variáveis com incertezas, representadas mediante números fuzzy, são relacionadas mediante operações fuzzy para avaliar o Risco que também será representado por um número fuzzy. Este trabalho conclui que a representação de incertezas mediante os números fuzzy diminui o tempo computacional se comparado com uma representação probabilística.

Objetivando estudar a aplicação da lógica fuzzy na avaliação do Risco, A. B. Zolotukhin et. al. [9] estudam como as informações e avaliações feitas por especialistas podem ser usadas de forma mais eficiente, caso estas sejam expressas por valores subjetivos. Para isso apresenta a aplicação da inferência **Mamdani** e dos números fuzzy na atividade OFFSHORE.

Já W. G. de Ru [17] e Earl Cox [18] aplicam a inferência monotônica para avaliar o Risco associado ao desenvolvimento de um projeto e na segurança de equipamentos computacionais. A inferência monotônica baseia-se em determinar o valor da verdade diretamente da função de pertinência, sem necessidade de realizar um processo de desfuzificação.

José A. Bogarin, et. al. [20] avaliam o Risco associado ao dano por fratura em vasos de pressão mediante a expressão $R = C \circ E \times L$, na qual **R** é o Risco, **C** a conseqüência, **L** probabilidade e **E** a exposição a um evento. Na expressão anterior, o operador “ \circ ” e “ \times ” representam a operação composição e produto cartesiano respectivamente. Neste trabalho avalia-se a vida útil, tempo de inspeção mínimo e máximo dos vasos de pressão com base nos conceitos fuzzy.

Kinji Ikyma e Dan M. Frangopal [13] avaliam o Risco em sistemas de tubulações através de um índice que quantifica a correlação entre as conseqüências de uma falha e os fatores que a originam. A lógica fuzzy é aplicada para avaliar esta correlação.

Alberto Ildefonso e José Luiz de França Freire [46], representam os valores numéricos presentes no modelo Muhlbauer como não determinísticos, isto é, admitindo uma incerteza. Para incorporar esta incerteza no cálculo do valor do Risco procurou-se trabalhar com números fuzzy. Esta incerteza é avaliada por uma função de pertinência normalizada. Operações de soma, subtração, multiplicação e divisão são possíveis para os números fuzzy. Como resultado final torna-se possível encontrar-se não só um número que define o Risco como também a incerteza (faixa de valores) que este Risco pode ter, que é uma função das incertezas das avaliações individuais das variáveis.

Como se pode observar, os diversos trabalhos aplicam as técnicas quantitativas ou qualitativas para avaliar o Risco.

No entanto, como mencionado em [17] “muitas variáveis usadas para avaliar o Risco são difíceis de serem quantificadas, por conseguinte, estas são de natureza vaga e para assegurar a representação deste cenário é necessário que a natureza vaga da variável seja refletido no modelo. Por exemplo, a satisfação dos empregados dentro de uma organização pode ser levada em consideração na avaliação do um possível Risco, entretanto, o grau de satisfação de um empregado é difícil de ser quantificado, em outras palavras, é um termo incerto”.

Sabendo que cenários de natureza vaga e incerta encontram-se presentes também quando se avalia o Risco nos sistemas de tubulações e sendo a teoria de lógica fuzzy uma das teorias mais utilizadas para trabalhar com variáveis em cenários incertos, na qual as informações são expressas em termos lingüísticos ou informações, esta pode ser aplicada para avaliar o Risco nos dutos. Contudo, a teoria de lógica fuzzy tem sido muito pouco aplicada na avaliação do Risco de tubulações, tanto assim, que trabalhos realizados por S. Bonvinivi, et al. [8], Kinji Ikyma e Dan M. Frangopal [13] ou de

Alberto Ildefonso e José Luiz de França Freire são os únicos encontrados na qual aplicam a lógica fuzzy na avaliação do Risco em dutovias.

Com o exposto, a presente tese persegue os seguintes objetivos:

1- Apresentar o método Muhlbauer para avaliar o Risco em sistemas de tubulação de transmissão de petróleo, gás ou derivados. O método Muhlbauer foi escolhido por ser detalhado, abrangente e de fácil aplicação aos trechos de tubulações, além de possibilitar o controle do Risco através de uma análise nas variáveis dos quatro índices de dano e do fator impacto de vazamento.

2- Mostrar os conceitos da teoria da lógica fuzzy que podem ser direcionados para a solução de problemas de Risco em sistemas de tubulação que transportam petróleo, gás ou derivados. Estes conceitos serão apresentados objetivando a compreensão da inferência Mamdani e dos números fuzzy. Escolheram-se estes, por que permitem o uso ilimitado de variáveis na avaliação do Risco, além de serem metodologias menos restritas se comparadas com as outras possibilidades que a lógica fuzzy oferece.

3- Identificar sistema de lógica fuzzy (SLF) mediante a avaliação dos diferentes tipos de agregação, desfuzificação, quantidades de conjuntos fuzzy e de geração de regras. Isto por que geralmente o tipo de agregação, desfuzificação, quantidades de conjuntos fuzzy e de geração de regras de um SFL variam de problema a problema. Uma boa escolha destas, influencia grandemente no desempenho do SLF.

Dentro das principais pontos a identificar em um SLF estão:

Quantidade de variáveis lingüísticas de entrada

Quantidade de valores lingüísticos

Tipo de valores lingüísticos

Tipo de implicação, agregação e desfuzificação

Geração de regras

Tipo de inferência

Andreas Bastian [21] menciona que pode-se na literatura encontrar diversos trabalhos que identificam algumas das características, no entanto, são raros os trabalhos nos quais se analisa todas as características

4- Desenvolver métodos qualitativos que avaliem o Risco associado às operações dos sistemas de tubulação, objetivando analisar a influência de incertezas das variáveis. Os métodos qualitativos existentes que avaliam o Risco dos sistemas de tubulações (HAZOP, QRA, Matriz de Risco, Árvore de Falhas, Cenários Possíveis, Sistemas de Pontuação, inclusive o método Muhlbauer), apresentam as diversas variáveis que influenciam no Risco dos dutos mediante a atribuição de valores quantitativos. No entanto, sendo métodos qualitativos, estas variáveis não podem ser informadas através de valores exatos. Estas variáveis podem ser tratadas como provenientes de distribuições randômicas. Entretanto, identificar as distribuições randômicas pode exigir muito esforço e investimento econômico. Sendo assim, faz-se necessário desenvolver métodos subjetivos que na sua análise levem em consideração as incertezas das variáveis, sem que estes métodos estejam em desvantagens respeito aos métodos qualitativos existentes.

5- Gerar ferramentas computacionais (software) com interface amigável para o cálculo do Risco e/ou gerenciamento das tarefas a realizar para diminuir o Risco. Atualmente, as ferramentas com interface amigável para avaliar o Risco são muito difundidas por facilitar a tarefa do analista do Risco, tanto assim, que empresas operadoras de dutos em parceria com instituições privadas desenvolvem suas próprias ferramentas computacionais. Por exemplo, o PIPESAFE [22] foi desenvolvida por um grupo de companhias operadoras de gás em parceria com a empresa ADVANTICA. W. Kent Muhlbauer também disponibiliza sua metodologia através da ferramenta computacional elaborada com base no software DELPHI. A geração destas ferramentas computacionais é incentivada devido a necessidade do tratamento de grandes quantidades de informações na solução do problema, no qual, somente essas ferramentas conseguiriam obter as respostas em um tempo relativamente curto.

1.8

APRESENTAÇÃO DA TESE

O conteúdo desta tese divide-se da seguinte maneira:

O capítulo dois explica o modelo Muhlbauer, as variáveis necessárias para avaliar e controlar o Risco associado às operações dos sistemas de tubulação, além de uma análise de benefício - custo. Neste capítulo também se analisará a influência que a Análise de Integridade Estrutural (AIE) dos dutos pode ter na avaliação do Risco, além, de propor uma metodologia onde o gerenciamento do resultado do Risco levará à determinação ótima do tempo de inspeção nos dutos.

No capítulo três encontram-se as definições básicas da lógica fuzzy e menciona-se também como um sistema de lógica fuzzy pode ser identificado. Para isto, define-se a inferência Mamdani, método de agregação e desfuzificação, números fuzzy, etc.

A geração dos modelos qualitativos para avaliar o Risco baseado na teoria da lógica fuzzy e do método Muhlbauer encontra-se no capítulo quatro. Nele, três modelos são explicados, os dois primeiros gerados segundo a inferência Mamdani e o terceiro nos números fuzzy.

Já no capítulo cinco, apresenta-se a análise de Risco de quatro casos de estudos mencionados na referência [15] segundo o exposto no capítulo dois e quatro.

Finalmente no capítulo seis, as observações, conclusões e recomendações geradas durante o desenvolvimento da presente tese são mencionadas.

Na seguinte figura apresenta-se o fluxograma geral da presente tese.

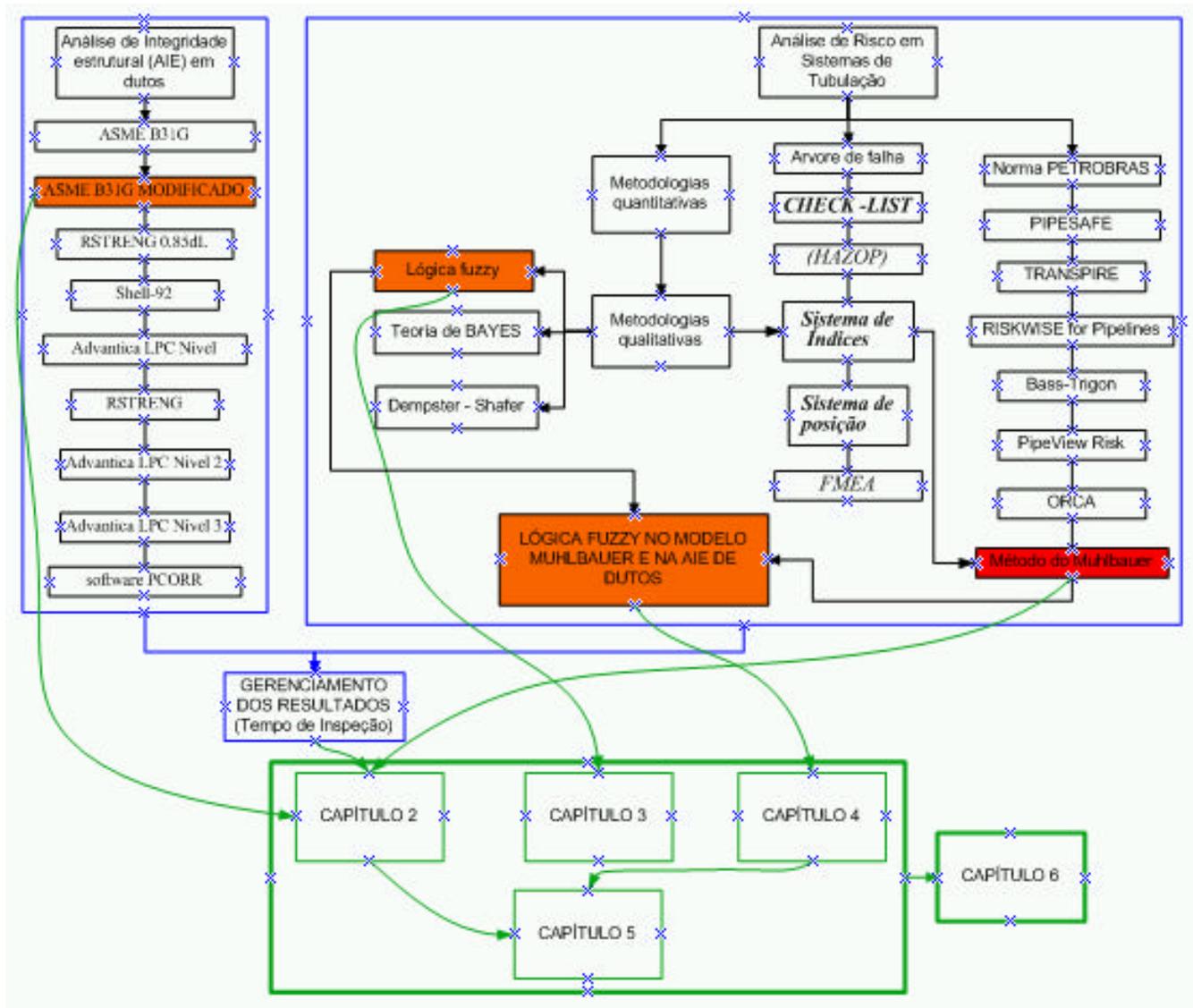


Figura 1.1: Fluxograma geral da pesquisa a realizar.