

1 Introdução

1.1. Identificação do Problema

Na indústria de petróleo, com muita frequência, utilizam-se dutos para o transporte de fluidos, tanto no estado líquido como gasoso, devido ao baixo custo e pela segurança operacional. De um modo geral, o projeto destas linhas é realizado considerando condição de escoamento em regime permanente. Em condições operacionais pode até ocorrer alterações temporais nas condições de escoamento, mas não se espera que estas alterações sejam tão grandes que levem a uma descaracterização da hipótese de regime permanente, utilizada no momento do projeto do sistema de produção. Porém, em um grande número de situações, a hipótese de regime permanente não pode ser utilizada, como por exemplo, nas análises de garantia de escoamento, de estabilidade de escoamento e de surgência de poços.

Linhas submarinas são muito utilizadas na produção e no transporte de petróleo e seus derivados. Nestes casos, um fenômeno adicional precisa ser considerado, i.e., a transferência de calor entre o petróleo e a água do mar, que se encontra a baixa temperatura.

Atualmente, é da garantia de escoamento que vem a maior demanda para análises de escoamentos transientes. Parada de produção e fechamento de válvulas de segurança são eventos que promovem perturbações em um sistema de escoamento de petróleo. Após uma parada de produção, o transiente termo-hidráulico dos fluidos contidos na linha de produção torna-se crítico. Neste caso, por exemplo, as válvulas “Máster-1” e a SDV (Válvula de parada de emergência), ilustradas na Fig. 1.1, referente ao poço e à plataforma são fechadas. Nesta situação, o fluido fica confinado na linha entre estas duas válvulas, e devido à temperatura ambiente baixa, uma parada de produção por um longo tempo pode levar os fluidos contidos na linha a uma condição de temperatura baixa. Diversos problemas podem surgir quando baixas temperaturas são atingidas, entre estes se

podem citar o problema de formação de hidratos e o problema de parafinação. Estes problemas são graves, pois podem levar a interrupção de produção, com grandes prejuízos financeiros. Determinar o tempo que se terá para se tomar alguma ação após uma parada de produção antes que os fluidos contidos na linha se encontrem em uma condição desfavorável é importante. Caso este seja muito curto, isto será um indicativo de que o projeto da linha deve ser modificado, alterando, por exemplo, o isolamento desta (Ferreira, 2004).

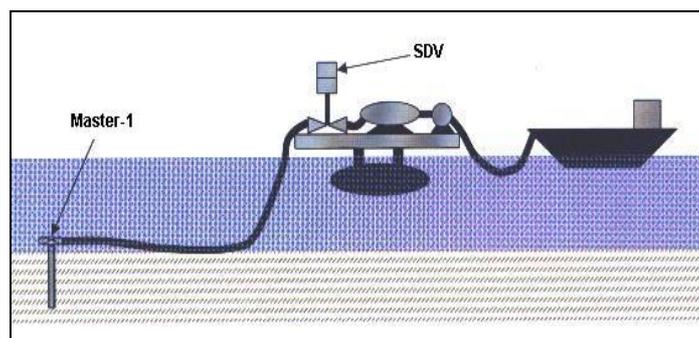


Figura 1.1 – Disposição da Master-1 e da SDV em uma linha de produção

A formação de hidratos em linhas e equipamentos de produção pode gerar uma variedade de problemas como o aumento da potência de bombeamento, redução da vazão ou até mesmo o bloqueio total da linha, como ilustrado na Fig. 1.2, com perda da produção e do equipamento instalado.



Figura 1.2 - Bloqueio de linha por formação de hidratos

O problema envolvendo formação de hidratos tem sido reportado não só em dutos submarinos, mas em *manifolds* e inclusive nas linhas de exportação. Os hidratos são compostos cristalinos de água contendo alguns hidrocarbonetos leves, CO_2 e H_2S sob condições de elevadas pressões e baixas temperaturas, condições

que prevalecem em operações em águas profundas. A Fig. 1.3 ilustra um diagrama de fase e sob que circunstâncias os hidratos são formados. Nas condições à esquerda da curva os hidratos são formados, entanto que a operação à direita da curva esta livre da formação de hidratos.

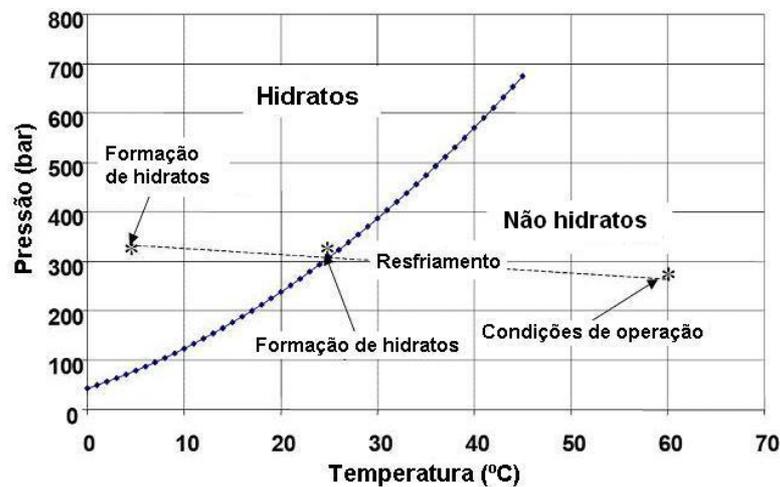


Figura 1.3 – Diagrama de fase e condições de formação de hidratos

Os problemas em operações de produção têm sido associados principalmente com sistemas de gás úmido onde as condições de formação de hidratos são favoráveis. Os hidratos tradicionalmente não têm sido considerados como um problema para sistemas de óleo cru, pois normalmente, antes do processamento, estes escoam relativamente quentes, e após o processamento, o transporte é realizado com o gás e a água separados do óleo. Porém, com a tendência da instalação dos sistemas de produção multifásicos em profundidades e distâncias cada vez maiores, a formação de hidratos se tornou um grande problema para o transporte do produto condensado. Nestas instalações, os hidrocarbonetos, contendo gás, juntamente com a água produzida podem resfriar até a temperatura do mar e inevitavelmente as linhas operarão perto ou dentro do envelope de formação de hidratos. Inclusive se o sistema operar fora do envelope de formação de hidratos sob condições de regime permanente, o potencial de formação de hidratos durante operações de parada e partida não pode ser ignorado (Forsdyke, 1997).

Outro problema operacional crítico enfrentado pela indústria do petróleo em águas profundas é a deposição de parafinas no interior dos dutos de produção e de transporte. O petróleo flui do reservatório a tipicamente 60 °C para as linhas de

produção. Essas linhas transportam para a plataforma e da plataforma para a costa. Em elevadas profundidades, a temperatura do oceano é da ordem de 5 °C. A solubilidade da parafina no petróleo é uma função decrescente da temperatura. Enquanto o petróleo flui, ele perde calor para a água circundante. Se certa temperatura crítica for atingida, a parafina pode precipitar-se da solução e depositar-se ao longo das paredes internas do duto, como mostrado na Fig. 1.4. Os depósitos podem ser formados por asfaltenos e resinas, embora a fração maior seja de hidrocarbonetos parafínicos. Além das frações orgânicas, os depósitos podem conter material inorgânico como areia e água e também podem variar em consistência, dependendo da história das condições nas quais eles foram formados. A formação de parafinas também pode ter um efeito crítico na viscosidade do óleo, a viscosidade pode mudar de magnitude a uma determinada temperatura quando quantidades suficientes de parafinas estão presentes no fluido. (Forsdyke, 1997).



Figura 1.4 - Bloqueio de linha por deposição de parafina

Alguns outros problemas encontrados pela indústria de petróleo, quando seus produtos ou derivados escoam em tubulações mergulhadas em um ambiente frio podem ser citados (ABB, 2004): condensação de líquido em tubulações com gás úmido, aumento substancial da viscosidade com diminuição da temperatura, acarretando graves problemas para reiniciar o bombeio devido ao aumento proibitivo da uma potência de bombeamento, e ainda problemas de abertura da coluna devido a baixas temperaturas.

O controle das perdas de calor isolando o duto é geralmente a melhor opção para prevenir a formação de hidratos e parafinas, mantendo o fluido escoando acima da temperatura de formação destes. No entanto, este método é limitado

pelas distâncias, ainda que utilizando um sistema super isolado como o *Pipe-in-Pipe*, este não poderá evitar o problema do resfriamento em distâncias maiores que 20 km (Forsdyke et al, 1997). Porém, uma vez atingida a temperatura de formação de parafinas, por exemplo, o isolamento oferecerá vários benefícios. As razões de formação de parafinas são diretamente proporcionais à razão de perda de calor do fluido, o isolamento pode, portanto, reduzir a taxa de formação de parafinas, mas não evitá-lo completamente. Durante uma longa parada da linha, os fluidos resfriarão até a temperatura ambiente, mas o isolamento estenderá o período de resfriamento evitando problemas na partida da linha associados com fluidos gelados ou muito viscosos.



Figura 1.5 - Arranjo *Pipe-in-Pipe*

Outro método utilizado para controlar as perdas de calor é enterrando um duto não isolado, o que além do benefício da proteção mecânica proporciona significantes benefícios térmicos. Um desafio em águas ultraprofundas é a elevada pressão hidrostática, pois a 650 m de profundidade a pressão hidrostática é significativa (aproximadamente 60 atm.), podendo reduzir a espessura do isolante e, portanto a efetividade da espuma isolante devido à compressão. Uma opção para resolver este problema é utilizando um sistema chamado *Pipe-in-Pipe* (PIP) (Heng et al., 2000). O *Pipe-in-Pipe*, ilustrado na Fig. 1.5, é a denominação dada a um tubo de parede composta, constituído de dois tubos de aço concêntricos cujo espaço anular é preenchido por material metálico, polimérico ou compósito. Esta estrutura tipo sanduíche, se devidamente projetada para atender aos requisitos de resistência, flexibilidade e isolamento térmico, pode representar uma opção atrativa a ser empregada em dutos submarinos e *risers* para aplicações em águas profundas.

Um método recentemente desenvolvido para diminuir as perdas de calor em um duto é aquecendo a linha (Sylvain et al., 2001), pois mesmo para uma linha de produção multifásica com um suposto isolamento perfeito, existe o risco de formação de hidratos devido à despressurização e conseqüente resfriamento do gás (efeito Joule-Thomson). Pode-se, então, utilizar uma combinação de um isolamento passivo com aquecimento por meio de cabos elétricos, colocados na superfície externa do tubo interno, em meio do isolamento térmico, como ilustrado na Fig. 1.6.

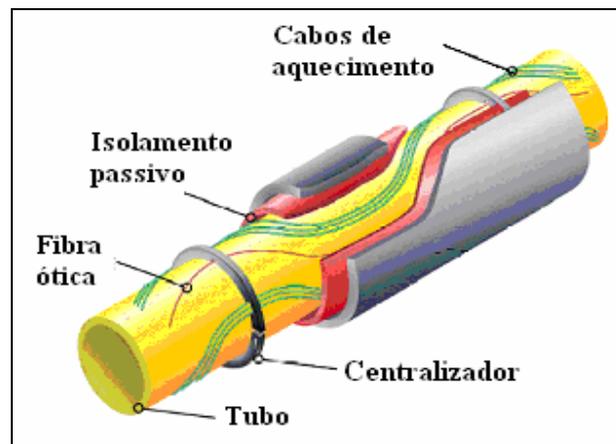


Figura 1.6 - Arranjo *Pipe-in-Pipe* aquecido eletricamente

Assim, a determinação correta dos perfis de temperatura do fluido escoando e do tempo que o fluido demora em atingir as temperaturas críticas de formação de hidratos ou parafinas devem ser cuidadosamente avaliados pelos diferentes *softwares* utilizados na simulação de dutos. Cálculos errados dos perfis de temperatura podem gerar problemas como, por exemplo, atingir alguma temperatura crítica em uma linha antes que as medidas de prevenção sejam completadas, ou super-dimensionar o isolamento das linhas criando um custo desnecessário. Todos os *softwares* de simulação de dutos utilizam algum tipo de modelo térmico, desde modelos simples supondo que todo o duto permanece sempre a temperatura constante, até modelos mais complexos que acoplam o transiente térmico no fluido com a transferência de calor na parede do duto.

Para analisar o transiente térmico em uma tubulação, e, portanto avaliar a perda de calor para o meio ambiente, é necessário considerar todos os possíveis mecanismos de transferência de calor. Durante uma operação, a convecção forçada é geralmente assumida como o mecanismo de transferência de calor

dominante entre o fluido e a parede do duto, mas em uma situação de parada da linha, a convecção natural também deve ser considerada. Adicionalmente, o fluxo de calor por condução através da parede da tubulação também deve ser corretamente avaliado.

A condução na parede da tubulação é geralmente muito mais lenta que a convecção, o que significa que modelos mais simples, que desprezam a capacidade térmica da parede, poderiam ser utilizados para modelar as perdas de calor na parede que o modelamento deste processo no fluido. Novamente, durante a parada de produção, a energia armazenada nas paredes da tubulação passa a ter um papel importante na taxa de resfriamento. Outro ponto a ser levado em consideração, é que os dutos possuem alta condutividade térmica, quando comparada com a do isolamento, assim, no escoamento em regime turbulento pode-se afirmar que o fluido e a parede do duto estão à temperatura uniforme. Esta suposição, não é mais válida quando o fluido está parado, neste caso o fluido não está mais a temperatura constante e terá uma taxa de perda de calor menor que quando o fluido está escoando. Neste tipo de situações, é importante incluir no modelo térmico as propriedades térmicas da parede do duto. (Modisette, 1997).

1.2. Motivação

Há alguns anos o Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio desenvolveu o simulador de passagem de pigs em tubulações, PIGSIM (Nieckele et al., 2000). O programa resolve numericamente as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia do fluido, acopladas com a equação de conservação de quantidade de movimento do *pig*. Modelos da força de contato entre o *pig* e as paredes do tubo também foram implementados.

Para contabilizar as perdas de calor do fluido com o ambiente, o PIGSIM utiliza um coeficiente global de troca de calor baseado nas resistências térmicas equivalentes dos materiais que compõem a parede. No caso da previsão do comportamento transiente da linha, o conhecimento do coeficiente global de troca de calor não é mais suficiente, sendo necessário considerar além da condutividade térmica, outras propriedades dos materiais da parede da tubulação, como a densidade e o calor específico. A previsão do comportamento transiente na parede é muito importante não só na determinação da mínima temperatura atingida pelo

fluido (formação de hidratos), mas também é relevante para a análise dos esforços térmicos.

Assim, considerou-se a necessidade de otimizar o cálculo da transferência de calor do fluido ao ambiente, levando em consideração as propriedades térmicas da parede da tubulação no cálculo do transiente térmico no fluido, após uma parada de produção. A transferência de calor por convecção natural do fluido ao duto também foi estudada.

1.3. Revisão Bibliográfica

Para a maioria dos casos práticos de escoamento, a hipótese de transferência de calor em regime permanente é a hipótese que deve ser utilizada. Mesmo quando o fenômeno analisado é caracterizado por transientes hidrodinâmicos, para a parte da modelagem que se refere à transferência de calor, a hipótese de regime permanente é muitas vezes aceitável. Em problemas de escoamento multifásico transiente, admitir que ao menos a transferência de calor pode ser tratada como em estado permanente é uma hipótese simplificadora e tentadora. Modela-se a hidrodinâmica como transiente e a troca térmica como permanente (Ferreira, 2004).

Infelizmente, não são todos os problemas de escoamento em que esta hipótese pode ser utilizada. Alguns exemplos em que a transferência de calor deve ser tratada como transientes são: processos que envolvem rápidas expansões de gás, descarga de grandes golfadas passando por um *riser*, parada de uma linha de produção, etc.

O desempenho térmico das linhas isoladas sob regime permanente ou transiente é uma informação fundamental para o projeto do sistema de escoamento multifásicos. No caso da previsão do comportamento transiente da linha, é necessário conhecer as propriedades termofísicas dos materiais que compõem a parede da tubulação e do fluido escoando, tais como massa específica, condutividade térmica e calor específico.

A revisão bibliográfica de alguns dos *softwares* comerciais disponíveis revelou que os seguintes *softwares* são os mais utilizados:

- (i) PIPELINE STUDIO, [Energy Solutions Inc., 2004]
- (ii) OLGA 2000 [Scandpower Petroleum Technology, 2000]

(iii) STONER PIPELINE SIMULATOR [Stoner Associates Inc., 2001]

O software *Pipeline Studio* para líquidos (TLNET) faz a simulação térmica calculando um coeficiente global de troca de calor baseado em resistências térmicas equivalentes. Já o *Pipeline Studio* para gases (TGNET) tem a opção *Wall temperature tracking* que calcula a distribuição de temperatura na parede durante o transiente levando em consideração as propriedades térmicas dos materiais da parede da tubulação. O *software* resolve a condução radial na parede do duto, podendo este ter várias camadas de isolamento. O cálculo dos coeficientes convectivos entre o fluido e a parede interna assim como entre a parede externa do duto e o ambiente é feito utilizando correlações empíricas; contudo, o programa não apresenta muitas explicações de como isto é acoplado com o transiente do fluido.

O módulo *3D Thermal* do *software* OLGA resolve o transiente térmico em dois passos. No primeiro, a equação da energia para o fluido e de condução de calor na primeira camada da parede do duto são resolvidas, obtendo o perfil de temperatura ao longo do duto e o perfil de temperatura na parede ao longo do duto. No passo seguinte, a equação de condução bidimensional é resolvida no meio ao redor do duto, fornecendo a distribuição de temperatura nas seções transversais ao longo do duto. A combinação das soluções destes dois passos resulta em um campo de temperaturas 3D.

No *Stoner*, o módulo *Transthermal* é utilizado para calcular o transiente térmico não só no fluido, mas também no ambiente ao redor do duto, esta característica é muito utilizada em ambientes sensíveis as mudanças de temperatura. Para isto é realizado o cálculo da transferência de calor radial para cada duto, considerando a interação térmica entre o fluido, duto, revestimento e solo. Portanto, o módulo requer especificação das propriedades térmicas de todos os materiais envolvidos para a solução da equação de condução de calor radial. A temperatura do fluido é inicializada por uma interpolação linear entre os valores fornecidos para os extremos de cada duto.

A seguir é apresentada uma breve descrição de alguns artigos abordando o tema:

Brown et al (1996) desenvolveram um modelo computacional para analisar o transiente térmico em linhas tipo *bundle*. O modelo combina a simulação transiente do programa OLGA com equações que representam a conservação de energia para o escoamento monofásico nas linhas auxiliares do *bundle*. A

interação entre as linhas foi modelada através da troca de fluxos de calor entre os dois simuladores, e também a partir da simulação bi-dimensional da convecção natural no espaço entre as linhas, dentro do tubo externo. O programa *Fluent* foi empregado na determinação dos coeficientes convectivos neste espaço. Os efeitos da massa térmica da parede do duto e do isolamento durante o transiente são negligenciados nesta análise, as resistências térmicas da parede e das camadas são consideradas por meio do coeficiente global de troca de calor. O comportamento transiente dos materiais das paredes e isolamento foi levado em conta indiretamente através de linhas fictícias onde não há escoamento de fluido, mas apenas transferência de calor por condução. O modelo desenvolvido foi utilizado na otimização de linhas sem que fossem apresentadas comparações com dados de campo ou laboratório.

Zabaras e Zhang (1998) apresentam um modelo analítico simplificado que utiliza o método de elementos finitos para determinar o desempenho térmico em condições de regime permanente e o transiente de resfriamento de diversas seções de *bundles* e também PIP. Para o cálculo em regime permanente, a temperatura de mistura do fluido é especificada junto com as condições de contorno convectivas na parede interior e exterior. Uma vez atingido o regime permanente, a temperatura e a distribuição de temperaturas na seção do *bundle* é armazenada para ser utilizada a seguir na execução do transiente de resfriamento. No cálculo do transiente de resfriamento, é assumido que o fluido está estagnado dentro do duto; portanto, não utiliza a condição de convecção na parede interior. Para a condição de convecção na parede exterior, o coeficiente de transferência de calor para esta condição é calculado utilizando correlações da convecção forçada.

Danielsen and Brown (1999) desenvolveram dois modelos para a previsão do comportamento térmico de linhas do tipo *bundle*. O primeiro modelo segue a mesma orientação dos modelos anteriores de combinar as simulações do OLGA com modelos para as linhas auxiliares. O segundo modelo, é um tratamento analítico aproximado, faz um balanço da troca de calor entre as diferentes linhas (produção, teste, transporte, e linha de aquecimento), utiliza as correlações do programa OLGA para a determinação dos coeficientes convectivos, e também considera as perdas de calor por condução nas paredes do duto. O modelo pode ser usado para avaliar o efeito do tamanho da malha e determinar que áreas precisassem ser refinadas. Também permite fazer uma análise de sensibilidade das

variáveis que afetam o coeficiente global de troca de calor como os coeficientes convectivos tanto interno quanto externo. Segundo os autores, este modelo é bem mais rápido que o modelo que envolve a simulação com o OLGA.

Um modelo iterativo simples foi proposto por Campos (2002) para auxiliar no projeto da espessura de isolamento em tubulações perdendo calor para o ambiente. Tanto convecção natural quanto forçada foram consideradas. A metodologia converge rapidamente em duas ou três iterações.

Taxy (2004) utiliza o código comercial *Fluent* para avaliar o desempenho do isolamento de *risers* do tipo *PIP*. Os elevados valores obtidos para o coeficiente global de troca de calor nos testes de laboratório com *risers* de 9 metros de comprimento, foram explicados através das simulações como sendo o resultado de convecção natural dentro do espaço do isolamento. A simulação computacional foi utilizada também para extrapolar os resultados dos testes de laboratório para *risers* com dimensões reais.

Erickson et al. (1992) desenvolveram um modelo computacional capaz de prever temperaturas em um duto multifásico sob condições de regime transiente. O modelo é usado principalmente para determinar o potencial de formação de parafina e hidratos durante operações de partida, parada e despressurização de dutos submarinos de petróleo e gás. O modelo consta de duas partes, a primeira utiliza uma versão do programa comercial OLGA, a qual tem sido acrescentada e chamada ConOLGA e permite calcular, por exemplo, o transporte do inibidor de corrosão. A segunda parte consiste de um modelo numérico da condução transiente de calor que estima como o solo ao redor do duto armazena e libera a energia térmica. O modelo tem a flexibilidade de utilizar diferentes condutividades térmicas, calores específicos e densidades para as diferentes camadas de terra.

1.4. Objetivo

O objetivo do presente trabalho é fazer um estudo do transiente térmico num processo de resfriamento durante uma parada de produção da linha (*shutdown*), levando-se em consideração a capacidade térmica do fluido e das diversas camadas que compõem a parede da tubulação. A parada de produção é simulada depois do fechamento de uma válvula na entrada da tubulação.

Para alcançar este objetivo, implementou-se a equação de condução de calor transiente no programa PIGSIM (Nieckele et al, 2000). As equações de conservação do fluido, acopladas com a equação de condução de calor transiente na parede do duto são resolvidas utilizando o método de volumes finitos.

É realizada também uma análise adimensional das equações que governam o transiente térmico no fluido e na parede de um duto exposto ao mar, contendo fluido estagnado inicialmente quente, seja ele líquido ou gás. Como consequência desta análise paramétrica, um estudo de sensibilidade das principais variáveis que influenciam no transiente térmico será realizado.

Os resultados obtidos das simulações são comparados com os softwares comerciais Pipeline Studio (*TLNET e TGNET*), OLGA e STONER.

1.5. Organização do Trabalho

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos, sendo este, Introdução, o primeiro.

No segundo capítulo é apresentada a modelagem matemática do problema, incluindo a geometria, as equações governantes, as hipóteses simplificadoras e as condições de contorno e iniciais.

O terceiro capítulo é dedicado ao desenvolvimento do modelo matemático utilizado. Apresentam-se na forma discretizada as equações de conservação assim como a equação de condução de calor nas camadas; são definidos o método empregado para a solução do sistema algébrico e os critérios de convergência e a metodologia utilizada na solução do problema.

Os resultados obtidos para os diferentes testes realizados são apresentados no Capítulo 4.

Finalmente, no Capítulo 5 apresentam-se as conclusões do trabalho juntamente com as recomendações e comentários finais.