

## Sistema de Aquecimento Elétrico Segmentado de Tubulações para Produção de Petróleo e Gás Natural em Águas Profundas

**Deise Helena Kullmann**

Programa de Engenharia Nuclear, COPPE  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Caixa Postal 68509, Rio de Janeiro, CEP 21945-970, Brasil  
dkullmann@con.ufrj.br

**Jian Su**

Programa de Engenharia Nuclear, COPPE  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Caixa Postal 68509, Rio de Janeiro, CEP 21945-970, Brasil  
sujian@con.ufrj.br

**Resumo.** Neste trabalho, apresentamos um sistema de aquecimento elétrico segmentado de tubulações compostas para produção de petróleo e gás natural em águas profundas e ultra-profundas. Primeiramente são discutidos os requerimentos de garantia de escoamento na produção submarina e a necessidade de tubulações com aquecimento ativo. Em seguida, apresentamos uma análise global do balanço energético das tubulações em condições típicas de águas profundas. Mostramos que o aquecimento ativo é necessário em tubulações longas, devido às limitações técnicas dos sistemas passivos de isolamento térmico. Examinamos então, o método que combina o aquecimento elétrico ativo e o isolamento passivo das tubulações. Consideramos o aquecimento ativo através de resistências elétricas inseridas na superfície interna do tubo de aço. Propomos um método de aquecimento segmentado para minimizar a demanda de potência elétrica para uma dada configuração da tubulação e, uma temperatura mínima especificada do fluido produzido. Os resultados numéricos mostram que uma significativa redução na demanda energética pode ser alcançada. Por fim, um sistema elétrico é proposto para implementar o aquecimento segmentado.

**Palavras-chave:** Garantia de escoamento, aquecimento elétrico ativo, análise térmica.

### 1. Introdução

Oleodutos, gasodutos e polidutos são meios econômicos e seguros para transportar grandes volumes de petróleo, derivados e gás natural a grandes distâncias. Nos últimos anos, a descoberta de reservas de petróleo localizadas a distâncias cada vez maiores do continente e em águas profundas e ultraprofundas fizeram da garantia de escoamento ("*flow assurance*") um assunto de atenção crescente, devido a possibilidade de formação de hidratos de gás e a deposição de parafinas nas tubulações da produção nestas condições de alta pressão e baixa temperatura (Minami et al., 2000, 1999, Su, 2003).

A garantia de escoamento é a capacidade de controlar e influenciar as características de escoamento do fluido produzido dentro do sistema de transporte do escoamento. Na água ultra profunda (UDW), a pressão hidrostática elevada e a baixa temperatura do ambiente submarino (4°C), geram os principais desafios da garantia de escoamento para o projeto dos risers de produção e das linhas de escoamento. A garantia de escoamento inclui todos os aspectos na garantia do transporte do petróleo ou gás natural do poço até seu destino sem interrupções ou perturbações na linha, requerendo um plano bem-estudado para garantia de que (i) a produção submarina seja o mais contínua possível durante a operação normal e (ii) a produção possa ser rapidamente suspensa quando necessário e posteriormente retomada com o mínimo de dificuldade e de tempo de parada (*downtime*).

Um método sistemático da garantia de escoamento foi apresentado por Saint-Marcoux e Kennedy (2002). Neste trabalho, Saint-Marcoux e Kennedy (2002) apresentaram uma revisão sistemática de todas as condições operacionais para as instalações sob estudo, incluindo o aquecimento da linha (*warm-up*), a ativação da produção (*well start-up*), a produção em estado estacionário (*steady-state*), desativação da produção (*shutdown*) e remediação de bloqueio. Esta análise funcional pode ser vista como uma revisão compreensiva de todas as fases do sistema, seja operando nas condições de projeto, durante eventos transientes ou durante as condições de parada.

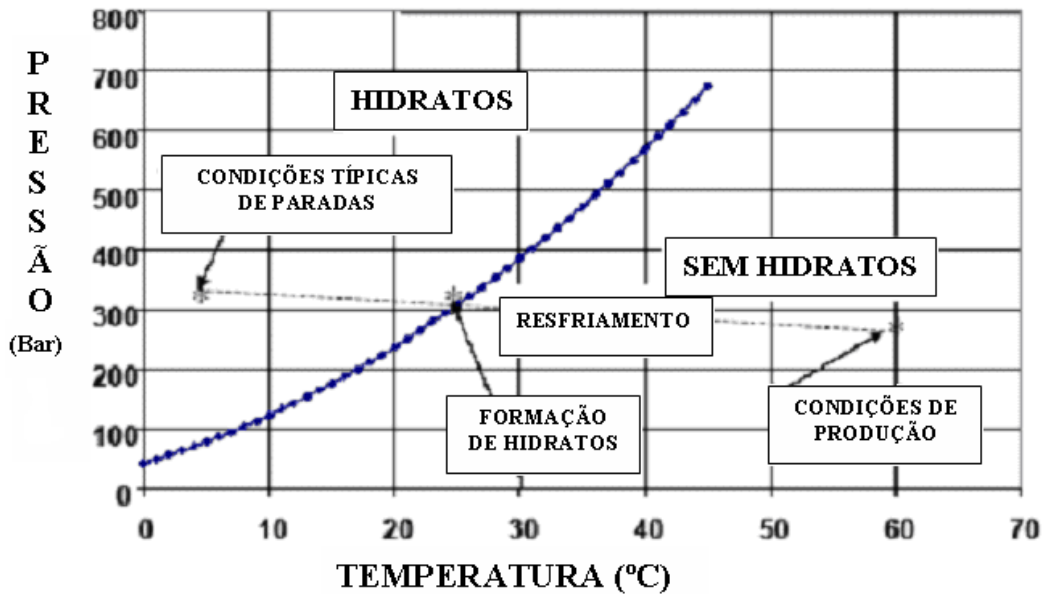


Figure 1: Diagrama de fase mostrando as condições de formação de hidratos.

A diferença de pressão disponível entre a cabeça do poço e o separador, determina o diâmetro mínimo da tubulação, enquanto a diferença de temperatura disponível determina a vazão mínima de produção. Uma análise global do sistema de produção submarina de petróleo e gás mostra que o isolamento térmico, juntamente com o aquecimento ativo dos tubos de escoamento e risers são uma das principais ferramentas de garantia de escoamento, tendo como principal objetivo controlar a temperatura do fluido nas tubulações de transporte da produção. A importância do controle da temperatura de transporte do escoamento multifásico em baixa temperatura e alta pressão, reside em evitar problemas como a formação de hidratos, a deposição de parafinas, reduzir a viscosidade do fluido para economia de potência de bombeio e em evitar a formação de emulsões.

A **parafina** é uma substância que ocorre naturalmente na maioria dos óleos crus e, dependendo da sua característica, pode ser problemática. O depósito de parafina ocorre quando a temperatura da parede do tubo é inferior simultaneamente à temperatura do ponto de névoa do fluido e à temperatura média do fluido (*bulk temperature*). A parafina se deposita e tende a reter água, areia e petróleo, formando depósitos de consistência, dureza e densidade variáveis, obstruindo a seção do duto. Estes depósitos podem ser limpos por solventes, detergentes ou dispersantes. Podem ser evitados pelo tratamento contínuo do fluido com inibidores, além da opção de limpeza mecânica por meio de "pig". Porém, no caso do transporte de petróleo, nem sempre estas opções estão disponíveis.

**Hidratos** são sólidos cristalizados de aparência semelhante a do gelo, formados por moléculas de gás natural, gás sulfídrico ou dióxido de carbono em contato com água em baixas temperaturas e altas pressões. Possuem densidade maior que a do petróleo e tendem a acumular-se nas restrições formando obstruções. Hidratos de alceno na forma de hidrato de metano cristalino podem se formar na temperatura de 21°C (70°F) a pressões de 300 bars (4.300 psi). Condições típicas de formação de hidratos são ilustradas na Figura 1, através de um diagrama de fases. O hidrato se forma nas condições acima da curva. Podemos observar que na condição típica de produção estacionária, a temperatura do fluido produzido está a cerca de 60°C e a pressão de 300 bars, estando bem afastada da curva de formação de hidrato. Porém, durante uma parada prolongada numa tubulação sem aquecimento ativo, a temperatura do fluido tenderá à temperatura da água do mar (cerca de 4°C), que está localizada dentro do envelope da formação de hidrato. A formação de hidratos pode ser evitada através da adição de inibidores tais como o etileno-glicol, porém, em condições mais severas de produção, a injeção volumosa de inibidores torna-se pouco prática para a produção.

Uma **emulsão** é formada por minúsculos glóbulos de óleo distribuídos na água, cuja reparação em baixas temperaturas é dificultada. O problema pode ser resolvido pela instalação de pré-aquecedores ou pela injeção de desmultificantes. A conjugação destes métodos com o isolamento do duto deve ser considerada, pois implica em espaço, peso e custo adicional na unidade de produção.

O **aumento da viscosidade** em decorrência da redução da temperatura pode dificultar o escoamento, exigindo maior potência de bombeio ou causando a redução de vazão. A utilização de isolamento térmico nos dutos pode reduzir a necessidade de aquecimento do fluido ou a potência de bombeio.

Com o aumento da lâmina de água e da distância da cabeça do poço, o isolamento térmico torna-se fundamental para a prevenção da formação de hidratos e parafinas, já que, quanto maior a lâmina de água e a

distância da cabeça do poço, maior o decaimento da temperatura no fluido transportado. O desafio do isolamento consiste em manter a temperatura do fluido acima da temperatura de formação de hidratos e parafinas a fim de evitar ou reduzir o uso de métodos alternativos como a utilização de "pig" e adição química. Tais métodos desprendem grandes quantidades de tempo e dinheiro e por isso, devem ser utilizados de forma controlada.

O problema de deposição em tubulações é dividido em duas categorias: saber quais depósitos são formados e o desenvolvimento de técnicas para manipular estes depósitos. A manipulação dos depósitos pode ser conseguida por remoção mecânica através da passagem de "pigs", tratamento químico, aquecimento ativo e técnicas que previnam a formação dos depósitos, como já anteriormente mencionado.

O isolamento térmico se tornou parte das especificações técnicas de tubulações rígidas e flexíveis, onde o perfil de temperatura e o coeficiente global de transferência de calor desejados são utilizados para especificar uma configuração adequada para a tubulação.

Uma vez especificada a configuração da tubulação para produção em estado permanente, os depósitos parafínicos devem ser evitados ou ao menos reduzidos nesta condição. Porém, a situação crítica de operação acontece em eventos transientes planejados ou não, tais como partidas e paradas da produção. Uma análise precisa da transferência de calor na tubulação composta é necessária para a previsão da evolução da temperatura em toda a tubulação. Durante estas operações, um sistema baseado no isolamento passivo pode requerer medidas de prevenção muito caras e complexas, como a injeção de inibidores químicos. A vantagem de sistemas de produção aquecidos é sua capacidade de lidar com uma escala larga de cenários de produção, como as temperaturas, vazões de escoamento e de como a composição do reservatório evoluirá durante a vida do campo. As exigências de aquecimento ativo são muito difíceis de serem estabelecidas de modo geral, pois são altamente dependentes da composição do reservatório, da produtividade do campo e de sua arquitetura.

Dois métodos do aquecimento ativo das linhas de escoamento em águas profundas foram estudados em anos recentes: o aquecimento elétrico e o aquecimento a partir da circulação de água aquecida. A literatura apresenta alguns casos onde o aquecimento elétrico dos tubos de escoamento multifásicos e dos risers submarinos de produção foi empregado para impedir a formação de hidratos e plugues de cera, como os apresentados por Halvorsen et al. (2000) e Lervik et al. (1998).

Lervik et al. (1998) apresentaram uma avaliação da viabilidade técnica e as estimativas de custo para um sistema de aquecimento elétrico direto de 50 Hz e para um sistema baseado na indução eletromagnética. Eles mostraram que a avaliação elétrica dos sistemas depende da exigência de aquecimento, do material da tubulação e do tubo de escoamento. A viabilidade dos conceitos foi verificada através de testes submarinos de tamanho real. Halvorsen et al. (2000), em um estudo semelhante, demonstraram que para proporcionar o aquecimento necessário das tubulações multifásicas em um sistema de 400 Hz, cabos de aquecimento elétrico com diâmetro de aproximadamente 30 mm e seção transversal do condutor de 120 mm<sup>2</sup> e, para o caso de um sistema de 50 Hz, cabos com diâmetro de aproximadamente 50 mm e seção transversal de 630 mm<sup>2</sup> são suficientes para tal fim. Eles também mostraram que a queda de tensão é tipicamente de 1 kV por quilômetro para o aquecimento de um riser.

Harrison e Herring (2000) apresentaram um sistema de aquecimento ativo usando a água quente que circula no espaço anular do PIP (Pipe-in-pipe) de circuito fechado, no qual o isolamento externo em torno da tubulação e o revestimento enterrado/escavado, fornecem o isolamento térmico dos tubos de escoamento em um sistema de produção que consiste em duas plataformas de produção interligadas. O energia que alimenta o sistema de aquecimento é fornecida por um gerador de eletricidade localizado em uma das plataformas do sistema de produção apresentado. Um modelo detalhado usando a ferramenta de software OLGA foi desenvolvido para investigar a viabilidade da circulação do fluido aquecido no espaço anular isolado do PIP, com o objetivo de fornecer o aquecimento necessário à produção. Os resultados indicaram que a circulação de 3180 m<sup>3</sup> (20.000 BPD) de água aquecida partindo de uma das plataformas a 66°C, resultou em perfis aceitáveis de temperatura para os cenários críticos de produção para a configuração do sistema de produção investigado. Invertendo periodicamente o sentido do escoamento de HWC (circulação de água aquecida), o tubo de escoamento "frio" anterior, transformar-se-ia no tubo de escoamento "quente" e a cera acumulada seria removida através do pós-derretimento no vapor da produção. Harrison e Herring (2000) mostram que uma potência de bombeio de 895 kW (1200 Hp) é adequada para fazer circular os 3180 m<sup>3</sup> de fluido aquecido.

Chin e Roberts (2002) investigaram a transferência de calor no escoamento de gás/condensado durante parada/resfriamento de risers "lazy-wave" em águas profundas. O sistema investigado consiste em um tubo de escoamento de 15 milhas ligado a uma estrutura flutuante, através dos 9,800 ft de comprimento de um riser lazy wave. O poço situa-se a 6,350 ft de profundidade no Golfo de México. O sistema apresentado transporta uma mistura de gás-condensado com uma taxa de gás-óleo de 1000 scf/stb. Neste estudo, Chin e Roberts (2002) mostraram que, além da pressão, a transferência de calor externa e interna durante o período de resfriamento do sistema são alguns dos principais fatores de realocação de fase, devido aos efeitos combinados das forças gravitacionais e do empuxo em sistemas que transportam misturas de gás-condensado e óleo.

Uma estrutura flexível da tubulação, denominada IPB (feixe integrado de produção) foi apresentada por Felix-Henry e Secher (2002). O IPB é em um conjunto de riser flexível baseado na tecnologia umbilical de serviço integrado (ISU) e em outras tecnologias patenteadas. Neste sistema, o aquecimento ativo, que incorpora as mangueiras do elevador de gás é fornecido por meio de cabos de aquecimento traçante que são inseridos, juntamente com o material de isolamento passivo, nas camadas da armadura do IPB (mais detalhes em Felix-Henry e Secher (2002)). Felix-Henry e Secher (2002) mostraram que, dentre outras vantagens apresentadas pelo IPB, este sistema simplifica as operações offshore da instalação, o isolamento passivo mantém a temperatura de chegada do fluido multifásico transportado acima de um valor crítico nas condições padrão de serviço e, além disso, mostraram que o aquecimento ativo pode ser comutado durante paradas programadas e partidas, ou durante condições críticas de produção (perfil baixo da produção, temperaturas e/ou pressões de escoamento baixas). Um sistema equipado com os traçadores de aquecimento elétrico nas camadas da armadura terá o mesmo diâmetro externo que uma tubulação flexível isolada convencional e, além disso, esta tecnologia também permite o uso do isolamento flexível padrão da tubulação. As limitações do conceito das armaduras de aquecimento traçante estão na potência elétrica máxima de aquecimento disponível e/ou, no comprimento máximo disponível devido a pequena seção transversal dos condutores.

Laouir e Denniel (2001) relataram um programa de desenvolvimento lançado em 2000 pela Coflexip para introduzir o aquecimento ativo em sistemas de pipe-in-pipe (PIP). O PIP ativamente aquecido é baseado na comprovada tecnologia de aquecimento traçante, combinada com o projeto de bobinamento padrão do pipe-in-pipe. O aquecimento é gerado por cabos resistivos usando a baixa tensão, que complementam o desempenho isolando o PIP. Laouir e Denniel (2001) apresentaram uma simulação de resfriamento que mostrou que, uma diferença de temperatura de 30°C a 35°C entre o produto de hidrocarboneto e o ambiente poderia ser mantida com uma entrada típica de aquecimento de 20 W/m a 40 W/m para um PIP isolado e aquecido. Também demonstraram que, baixas entradas de potência elétrica são suficientes para estender o período de resfriamento do PIP.

Similarmente, Su et al. (2003) propuseram um conceito combinado de isolamento térmico e aquecimento ativo, introduzindo tiras de resistência elétrica nos tubos de escoamento multicamadas. Foi realizada a análise global da distribuição de calor para determinar a demanda de entrada de potência elétrica e posteriormente, a análise térmica de estado estacionário, para determinar a distribuição de temperatura na seção transversal dos tubos de escoamento multicamadas, sob condições típicas de produção em águas ultra profundas foi executada. Um modelo matemático foi desenvolvido para analisar a transferência de calor de estado permanente nos tubos de escoamento multicamadas. As equações diferenciais parciais foram resolvidas com base no uso do método numérico de volumes finitos. À partir dos resultados numéricos, Su et al. (2003) demonstraram que com uma fonte de alimentação de 0,3 V/m e com quatro tiras de cobre com 1 mm de espessura e uma largura de 4 mm, distribuições aceitáveis de temperatura do escoamento e temperatura da superfície interna da tubulação são obtidas. Neste estudo, Su et al. (2003) demonstraram também que, com uma fonte de alimentação mais baixa, a área da seção transversal do calefator aumentará; já para uma tira mais fina do calefator, a diferença da temperatura entre o fluido produzido e a superfície interna da tubulação será diminuída, embora isto possa introduzir dificuldades na fabricação e na instalação. Por fim, eles mostraram que os tubos de escoamento multicamadas com aquecimento ativo são uma solução viável para suprir as severas exigências da garantia de escoamento da produção de óleo em águas profundas e ultra profundas.

Uma análise da transferência de calor transiente nos tubos de escoamento multicamadas com aquecimento elétrico ativo foi apresentada recentemente por Su et al. (2005). Três configurações dos tubos de escoamento multicamadas, com polipropileno contínuo como o material de isolamento térmico, foram estudadas através de simulações numéricas. Os resultados numéricos indicaram que, embora o isolamento térmico passivo fosse adequada para condições de estado estacionário de produção, o aquecimento esteve requerido durante as paradas planejadas e não planejadas. Comparando os três casos estudados, eles observaram que a demanda de potência elétrica de aquecimento por unidade de comprimento era menor se a camada de isolamento térmico fosse mais espessa. Neste estudo, eles indicaram que um acordo deve ser conseguido nas especificações do tubo de escoamento, considerando as despesas mais elevadas associadas o isolamento térmico mais espesso e o aumento da despesa operacional associado a maior demanda de potência elétrica de aquecimento.

É imperativo que o isolamento térmico passivo é usada em todas as tubulações em águas profundas para a produção multifásica de óleo e de gás, pois este é o método mais econômico para evitar a formação de hidratos e a deposição de cera. A decisão de como a garantia do escoamento adicional é apropriada para o desenvolvimento de um campo em particular, depende das considerações econômicas, de engenharia e ambientais. O método de aquecimento elétrico requer uma capacidade adicional de geração de potência elétrica na plataforma, de 10 a 30 MW, dependendo da configuração do sistema. Nenhuma dificuldade significativa é esperada no projeto mecânico e na instalação da tubulação com aquecimento elétrico. Por outro lado, o sistema aquecimento por circulação de água (HWC) é superior do ponto de vista termodinâmico, pois o calor liberado pelos excitadores da turbina pode ser reconvertido, sem necessidade energética adicional, embora o projeto mecânico e a instalação

sejam mais caros e complicados. Portanto, a escolha do sistema de aquecimento ativo a ser adotado depende fortemente das necessidades e da configuração do sistema de produção a ser aquecido.

Neste trabalho, apresentamos primeiramente uma análise global do balanço energético das tubulações em águas profundas típicas. Mostramos que o aquecimento ativo é requerido para as tubulações longas, devido às limitações técnicas dos sistemas passivos de isolamento térmico. Examinamos então, o método que combina o aquecimento elétrico ativo e a isolamento passivo das tubulações. Consideramos o aquecimento ativo através de resistências elétricas inseridas na superfície interna do tubo de aço. Para este caso, propomos um método de aquecimento segmentado para minimizar o requerimento de potência elétrica de aquecimento para uma configuração dada da tubulação e, desejamos encontrar a temperatura mínima especificada do fluido produzido. Os resultados numéricos são mostrados então. Uma redução significativa na demanda de potência de aquecimento é conseguida e, por fim, um sistema elétrico é proposto para implementar o aquecimento segmentado.

## 2. Análise Térmica

Consideramos uma tubulação em águas profundas, tipicamente isolada, para produção de óleo e de gás. Nesta situação, normalmente, o perfil térmico desejado do fluido produzido e o coeficiente total de transferência de calor são usados para especificar uma configuração adequada da tubulação.

O coeficiente global de transferência de calor para uma tubulação composta multicamadas é definido como:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum_{i=1}^N \frac{r_1}{k_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} + \frac{r_1}{r_{N+1} h_a}} \quad (1)$$

onde o  $r_i$  e  $r_{i+1}$  são os raios internos e externos da  $i$ -ésima camada, respectivamente,  $k_i$  é a condutividade térmica,  $h_1$  o coeficiente de transferência de calor entre a camada mais interna e o fluido produzido que escoo dentro dela e  $h_a$  o coeficiente de transferência de calor entre a camada mais externa e o fluido ambiente.

Pela primeira lei da termodinâmica, a equação unidimensional de transporte da energia do fluido produzido é escrita como

$$\dot{M}_f c_{p,f} (T_{f,in} - T_{f,out}) = U 2\pi r_1 L \Delta T_m \quad (2)$$

onde  $\dot{M}_f$  é a vazão mássica do fluido produzido,  $c_{p,f}$  o calor específico,  $T_{f,in}$  e  $T_{f,out}$  são a temperatura de entrada (wellhead) e da saída (TLP) do fluido produzido, respectivamente,  $r_1$  é o diâmetro da camada mais interna da tubulação de aço e  $L$  o comprimento da tubulação. A diferença média de temperatura entre o fluido produzido e o fluido ambiente é definida como:

$$\Delta T_m = \frac{(T_{f,in} - T_a) - (T_{f,out} - T_a)}{\ln [(T_{f,in} - T_a)/(T_{f,out} - T_a)]} \quad (3)$$

onde  $T_a$  é a temperatura do fluido ambiente.

Para um dado raio interno da tubulação  $r_1$ , uma temperatura dada do fluido ambiente e um perfil térmico desejado ( $T_{f,in}$ ,  $T_{f,out}$  e assim  $\Delta T_m$ ), o comprimento máximo  $L_{max}$  da tubulação que pode ser encontrado, com a exigência do perfil térmico, são uma função do coeficiente total  $U$  e da taxa de transferência de calor  $\dot{M}_f c_{p,i}$  do fluido produzido. Da Eq. (2), resolvemos

$$L_{max} = \frac{\dot{M}_f c_{p,f} (T_{f,in} - T_{f,out})}{U 2\pi r_1 \Delta T_m}. \quad (4)$$

Como a capacidade térmica do fluido produzido,  $\dot{M}_f c_{p,f}$ , é dada geralmente pela planta de desenvolvimento do campo, o comprimento máximo de uma tubulação, que pode ser encontrado com a exigência do perfil térmico, é inversamente proporcional ao coeficiente total de transferência de calor da tubulação,  $U$ . O menor coeficiente total de transferência de calor, mais longo o comprimento da tubulação até que a temperatura de saída do fluido produzido possa ser encontrada com a exigência da garantia do escoamento.

Mas, devido à existência de limitações técnicas numa maior redução do coeficiente total de transferência de calor, para uma tubulação que possua um comprimento  $L$  maior do que  $L_{max}$ , apenas a isolamento térmico passivo não é suficiente para conservar a temperatura do fluido produzido acima de um mínimo requerido. O aquecimento ativo é necessário então em uma combinação com o isolamento térmico passivo.

Se o aquecimento ativo for usado, para um comprimento dado  $L$  da tubulação, podemos determinar a demanda de potência de aquecimento ativo, que é necessária para encontrar o perfil térmico desejado. O balanço global de energia, para este caso, é escrito como

$$\dot{M}_f c_{p,f} (T_{f,in} - T_{f,out}) + \dot{Q} = U 2\pi r_1 L \Delta T_m \quad (5)$$

onde  $\dot{Q}$  é a demanda de potência de aquecimento ativo. Podemos resolver através da Eq. (6)

$$\dot{Q} = U2\pi r_1 L \Delta T_m - \dot{M}_f c_{p,f} (T_{f,in} - T_{f,out}) \quad (6)$$

Óbviamente, se todos os parâmetros restantes forem os mesmos, quanto mais longa a tubulação, maior a demanda de potência de aquecimento. A entrada linear média de energia na tubulação pode ser calculada como:

$$\dot{q}_{av} = \frac{\dot{Q}}{L} = U2\pi r_1 \Delta T_m - \frac{\dot{M}_f c_{p,f} (T_{f,in} - T_{f,out})}{L} \quad (7)$$

Agora, consideramos o aquecimento elétrico direto de uma tubulação composta multicamadas. Supondo que as propriedades termofísicas do fluido produzido e dos materiais da tubulação são constantes, podemos escrever a equação unidimensional de transporte de energia do fluido produzido como:

$$\dot{M}_f c_{p,f} \frac{dT_f(x)}{dx} = -U2\pi r_1 L (T_f - T_m) + \dot{q}(x) \quad (8)$$

onde  $\dot{q}(x)$  é a taxa linear de entrada de energia de aquecimento elétrico direto à tubulação. Para a especificação dada de entrada linear de energia, a distribuição da temperatura ao longo da tubulação pode ser prontamente obtida resolvendo a Eq. (8). Estamos interessados em determinar uma distribuição da taxa de energia linear otimizada,  $\dot{q}(x)$ , que minimize a energia total consumida, mas que ainda mantenha a temperatura do fluido produzido acima de um mínimo especificado.

Ao invés de formular um problema de otimização contínua com restrições, que seja complexo de ser resolvido, apelamos às introspecções físicas e obtivemos uma solução de engenharia para o problema. Propomos começarmos somente a aquecer a tubulação quando a temperatura do fluido produzido alcança uma temperatura mínima pré-especificada,  $T_{min}$ . O aquecimento deve manter a temperatura do fluido produzido a uma temperatura constante, esta,  $T_{min}$ . A taxa de aquecimento linear requerida é obtida igualando o lado de direito da Eq. (8) a zero:

$$\dot{q} = U2\pi r_1 L (T_{min} - T_m) \quad (9)$$

Na falta dados mais realísticos de uma tubulação e de dados melhores à respeito da produção, simulamos uma tubulação hipotética, com 27 km de comprimento e 6" (0.154 m) de diâmetro interno. O coeficiente total de transferência de calor da tubulação é 5.35 W/m<sup>2</sup>K, baseado no diâmetro interno da tubulação. A temperatura na cabeça do poço do fluido produzido é dada como 76.0°C e da água do mar como 4.0°C. Uma taxa de fluxo de massa de 14.72 kg/s é suposta com uma densidade constante de 800 kg/m<sup>3</sup> e o calor específico de 2700 J/kg°C. A temperatura mínima requerida do fluido produzido é 30°C.

Na Figura 2, mostramos uma comparação da distribuição de temperatura obtida pelo aquecimento uniforme de todo o comprimento da tubulação com a distribuição de temperatura obtida pelo método de aquecimento segmentado, que é a nossa proposta. Pelo primeiro método, uma taxa de aquecimento linear de 41.52 W/m é requerida para manter a temperatura do fluido produzido acima de um mínimo pré-especificado,  $T_{min} = 30^\circ C$ . A potência total requerida é 1.12 MW. Através do método de aquecimento proposto, não há calor injetado nos primeiros 15804.7 m da tubulação. A partir deste ponto, uma taxa de aquecimento linear de 66.60 W/m é requerida para manter a temperatura do fluido produzido acima de um mínimo pré-especificado,  $T_{min} = 30^\circ C$ . A potência total requerida agora é 745.6 kW, a qual representa uma redução de 33.4% na potência de aquecimento requerida.

Pode ser visto claramente, através da Figura 2, que com o primeiro método, o aquecimento do fluido produzido na primeira porção da tubulação é desnecessário, representado na figura pela área entre as duas curvas e, esta representa a energia despendida para o ambiente. Do ponto de vista termodinâmico, a energia requerida é minimizada se a diferença de temperatura entre o fluido produzido e a água do mar for minimizada, o que é alcançado através do não aquecimento da primeira parte da tubulação em nosso método.

### 3. Sistema Elétrico do PIP Ativamente Aquecido

Para introduzir uma solução ativa de aquecimento apropriada para sistemas pipe-in-pipe (PIP), Laouir e Denniel (2001) apresentaram uma tecnologia para o PIP ativamente aquecido que é baseada na comprovada tecnologia de aquecimento traçante combinada com o projeto de bobinamento padrão do pipe-in-pipe. O aquecimento é gerado por cabos resistivos usando a baixa tensão, que complementa o desempenho isolando o PIP.

A proposta a ser aqui apresentada usa um sistema similar ao apresentado por Laouir e Denniel (2001) em conjunto com a teoria de aquecimento segmentado do tubo de escoamento, exposta na Seção anterior. A

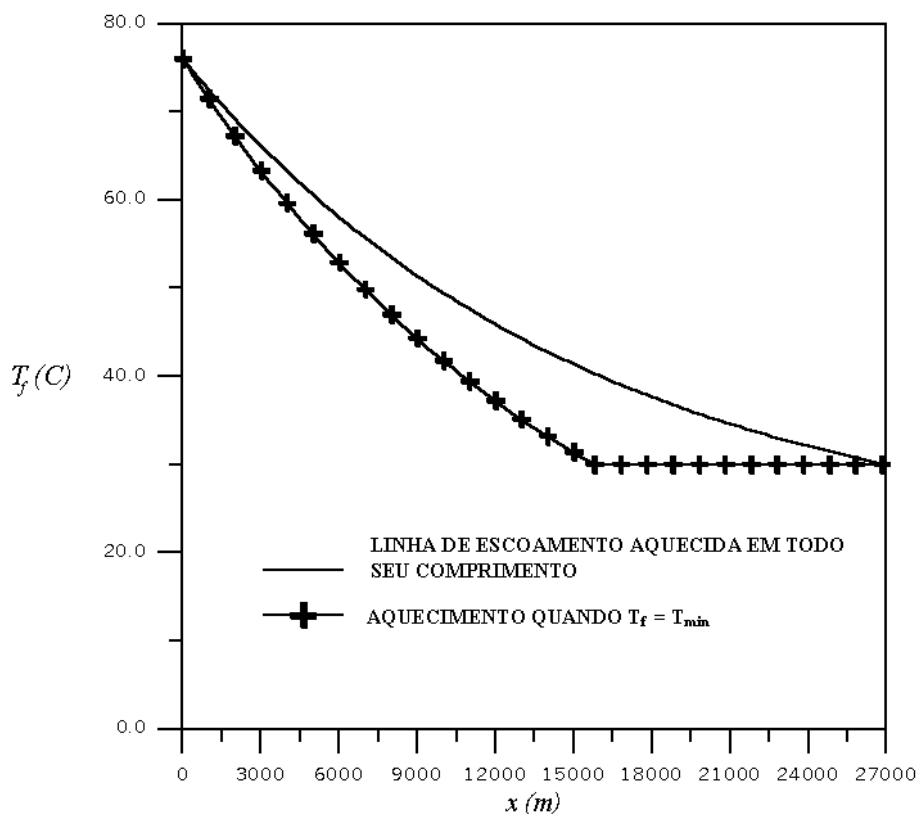


Figure 2: Comparação entre dois métodos de aquecimento.

configuração escolhida para o sistema ativamente aquecido do PIP é mostrada na Figura 3. O sistema de aquecimento tem a função de fornecer ao tubo de escoamento uma ferramenta que controla a troca de calor entre o fluido e o ambiente de águas profundas. O sistema de aquecimento para o PIP é uma solução projetada para auxiliar a execução da gerência de hidratos e de cera em campos de águas profundas. O sistema é aplicável aos sistemas do tubo de escoamento e do riser. A entrada de energia requerida é produzida pelo aquecimento resistivo dos cabos de aquecimento traçante quando ativados eletricamente. A tensão do sistema elétrico é variável, esta é controlada e monitorada da plataforma e do conjunto, dependendo da entrada de aquecimento requerida.

O sistema de aquecimento é instalado sobre a linha de escoamento e consiste em um sistema elétrico resistivo, montado em um circuito trifásico de conexão estrela. Cada circuito é constituído de três cabos de aquecimento traçante, que terminam em uma caixa de junção na extremidade de cada segmento da linha de escoamento a ser aquecida. O sistema de alimentação elétrica é feito através de uma ligação umbilical.

Além dos componentes padrão encontrados na tecnologia do PIP, como o sistema de espaçadores, material de isolamento de baixa condutividade térmica, etc., o sistema de aquecimento é caracterizado por sistemas distintos. O **Sistema de Aquecimento** é uma rede de cabos de aquecimento traçante. Estes cabos estão distribuídos uniformemente em torno do tubo de escoamento e agrupados nos conjuntos, espaçados em intervalos de 120°. Neste caso, é importante ressaltar que, os materiais usados no sistema de isolamento do PIP devem possuir características adequadas para o preenchimento das aberturas entre os cabos de aquecimento e, conseqüentemente, impedir a circulação de ar ao longo do PIP através dos sulcos do espaçador, o que poderia resultar em pontes térmicas, bem como manter os cabos alinhados em suas posições sob o tubo de escoamento.

Outro sistema presente no projeto do tubo de escoamento aquecido constitui-se do **Sistema de cabos de alimentação da fonte**, que é formado pelos cabos monofásicos da rede de alimentação trifásica da fonte que estão posicionados em paralelo com o sistema de aquecimento formado pelos cabos de aquecimento traçante, estendendo-se por todo o comprimento do tubo de escoamento.

As **Caixas de Junção** estão localizadas nas extremidades de cada segmento de aquecimento do tubo de escoamento, conectando uma seção a outra e isolando cada sistema de aquecimento separadamente. A unidade de terminação da extremidade do tubo de escoamento que suporta os conectores submarinos elétricos e óticos é requerida quando o aquecimento e os sistemas de monitoramento ótico da temperatura são controlados e monitorados através de um umbilical. Nas caixas de junção, também estão abrigadas as chaves de contato elétrico automáticas, utilizadas para abertura e fechamento dos sistemas de aquecimento em cada uma das

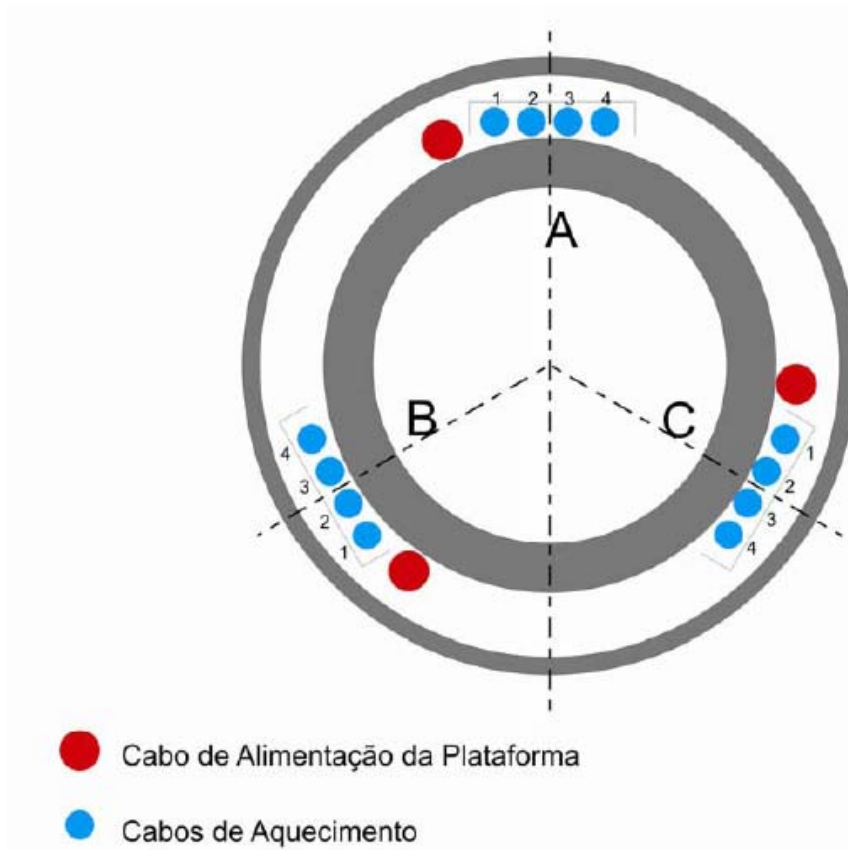


Figure 3: Distribuição dos cabos em torno da tubulação

seções do tubo de escoamento.

**Sistema de monitoração e controle ótico** consiste em uma ou mais fibras óticas colocadas entre os jogos de cabos de aquecimento, com a função de controle e monitoração da temperatura do sistema, bem como o controle e acionamento dos sistemas de aquecimento. A fibra é alojada em um duto de aço inoxidável para sua proteção. O sistema de monitoração ótico de aquecimento pode ser usado para permitir a leitura da temperatura ao longo do comprimento do tubo de escoamento e, através da monitoração destes dados da temperatura, o controle sobre as partes do sistema a serem aquecidas.

Cabe-nos agora, salientar alguns aspectos importantes encontrados no sistema elétrico proposto.

O sistema elétrico usado para o aquecimento adota conexões em ligação estrela trifásicas. Cada conexão estrela é terminada por uma caixa de junção abrigada dentro do espaço anular do tubo de escoamento onde a corrente total é zero. Nesta configuração, nenhum cabo de força de retorno é necessário para dar laços nos circuitos elétricos da rede de aquecimento.

Os arranjos dos cabos estão ilustrados na Figura 3. A figura mostra uma configuração dos cabos de aquecimento usando 3 conjuntos de quatro cabos igualmente espaçados em torno do tubo de escoamento. Neste cenário, cada conexão em estrela é formada por três cabos de aquecimento dos diferentes conjuntos situados nas regiões **A**, **B** e **C**, isto é, a conexão de estrela número  $n=1$  a 4 formada pelos cabos **An**, **Bn** e **Cn**. No exemplo ilustrado na Figura 3, quatro combinações de conexões em estrela trifásica são possíveis.

O sistema aquecido do PIP é projetado para ser alimentado e controlado através de um sistema umbilical no caso de um tubo de escoamento aquecido. Neste cenário, o umbilical é alimentado através da parede do tubo de escoamento, através de mangueiras cheias de óleo e conectores. As interfaces submarinas entre o PIP aquecido e o umbilical força/óptico representam uma parte principal do projeto.

Os módulos específicos do conector do PIP devem acomodar a conexão submarina entre o umbilical e a extremidade aquecida do PIP. Os conectores submarinos de força e óticos (parte integrante do sistema de aquecimento do PIP), são requeridos principalmente quando o sistema é controlado com um umbilical.

Os conectores submarinos de força atuam com elevada densidade de corrente. Uma vez acoplados, os pinos conectores de força e os soquetes devem permanecer no interior de câmeras individuais, preenchidas por óleo, para assegurar a segurança do sistema. Já o conector ótico submarino para os sistemas de monitoração de



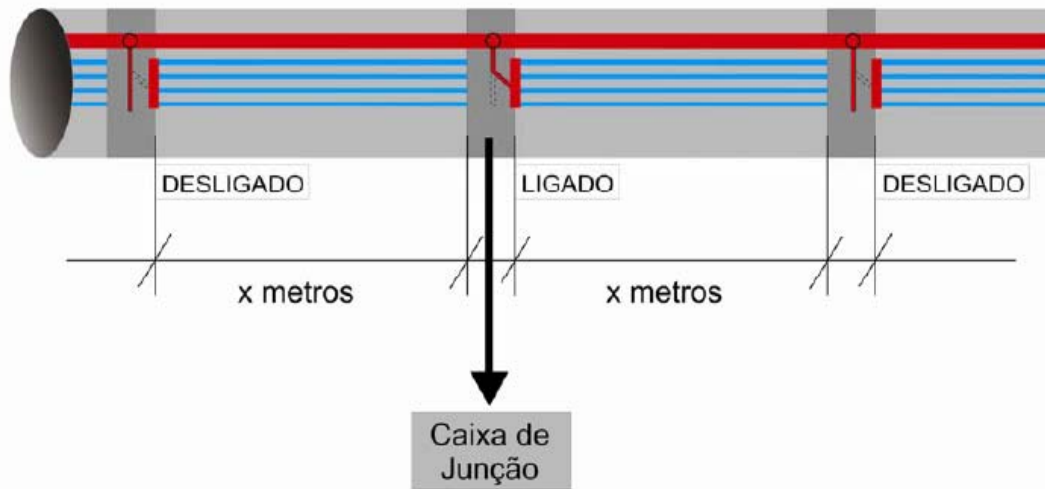


Figure 4: Ilustração de chaveamento automático de aquecimento elétrico.

temperatura deve permanecer com acoplamento limpo e seco.

Portanto, a modificação aqui proposta é que, ao invés de um sistema contínuo, o tubo de escoamento deverá ser dividido em segmentos, estes obedecendo ao padrão adotado por Laouir e Denniel (2001), ou seja, ao invés de um único sistema de aquecimento contínuo, como no modelo proposto, o tubo de escoamento poderá ser aquecido por partes, através de um sistema de abertura e fechamento de chaves de contato elétrico automáticas, comandadas através de um quadro de comando a ser instalado na plataforma e, o sistema aqui proposto, mantém a propriedade deste sistema de funcionar para diversas faixas de tensão.

Para alimentar os circuitos independentes (que compõe os diferentes segmentos da tubulação), os cabos de alimentação da fonte da plataforma devem ser incorporados à configuração, sendo estes necessariamente contínuos ao longo de toda a linha, como mostrado na Figura 4. Ou seja, o sistema de alimentação irá funcionar como um barramento em uma subestação elétrica, sendo controlado apenas pela posição das chaves de contato elétrico, comandadas através do sistema de controle instalado na plataforma.

Assim, com o sistema de aquecimento elétrico segmentado aqui proposto, pode-se fazer o aquecimento em partes pré-determinadas do tubo de escoamento ou em pontos críticos do sistema, que necessitem de maior ou menor aquecimento e, o tempo necessário de aquecimento também pode ser controlado ou, o mesmo sistema pode ser programado para operar em modo permanente, intercalando em determinados períodos de tempo os segmentos do tubo de escoamento a serem aquecidos, fazendo com que haja uma redução significativa na necessidade de potência de alimentação despendida.

#### 4. Conclusão

Neste trabalho, apresentamos primeiramente uma análise global do balanço energético das tubulações em águas profundas típicas para a produção de óleo e gás e, mostramos que o aquecimento ativo é necessário para tubulações longas, devido às limitações técnicas dos sistemas passivos de isolamento térmico. É apresentado o método que combina o aquecimento ativo e o isolamento passivo, neste caso, o aquecimento ativo é fornecido através de resistências elétricas inseridas na superfície interna do tubo de aço. Propomos um método de aquecimento que minimize a demanda de potência de aquecimento, para que o sistema alcance uma temperatura mínima especificada para fluido produzido. Os resultados numéricos estão ilustrados no trabalho, e mostram que o método de aquecimento proposto reduziu em 33,4% a necessidade de aquecimento da tubulação. Concluímos que o método de aquecimento aqui proposto reduzirá significativamente a demanda de potência de aquecimento, satisfazendo os requerimentos da garantia de escoamento, através do aquecimento elétrico direto da tubulação em um sistema segmentado.

#### 5. Agradecimentos

Os autores agradecem o CNPq, a CAPES e a FAPERJ pelos apoios a este trabalho. Deise H. Kullmann gostaria de agradecer ao CENPES/PETROBRAS pela bolsa de mestrado concedida.

## References

- Chin, Y. D. e Roberts, I. (2002). Heat transfer during gas/condensate flow shut down/cool down in deep-water lazy wave risers. In *Proceedings of 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE'02)*, Oslo, Norway.
- Felix-Henry, A. e Secher, P. (2002). Flexible risers with active heating recent developments with electrical heating. In *Proceedings of 3rd Workshop on Subsea Pipelines*, Rio de Janeiro, Brazil.
- Halvorsen, V. H., Lervik, J. K., e Klevjer, G. (2000). Hydrate and wax prevention of risers by electrical heating. In *Proceedings of 10th International Offshore and Polar Engineering Conference*.
- Harrison, G. E. e Herring, D. G. (2000). Active heating, dual production flowlines design for king sub sea tie-back at 1670 meters water depth. In *Proceedings of OMAE 2000 / PIPE-5050, Proceedings of ETCE/OMAE2000 Joint Conference*, New Orleans.
- Laour, N. e Denniel, S. (2001). Combining passive insulation and active heating for enhanced thermal performance. In *Proceedings of 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE'01)*, Rio de Janeiro, Brazil.
- Lervik, J. K., Ahlbeck, M., Raphael, H., Lauvdal, T., e Holen, P. (1998). Direct electrical heating of pipelines as a method of preventing hydrate and wax plugs. In *Proceedings of 8th International Offshore and Polar Engineering Conference*.
- Minami, K., Cardoso, C. A. B. R., Bezerra, M. C. M., e Melo, A. P. (2000). Roncador field development — the impact of fluid properties. In *Paper OTC-12138, presented at the 2000 Offshore Technology Conference*, Houston, Texas.
- Minami, K., Kurban, A. P. A., Khalil, C. N., e Kuchpil, C. (1999). Ensuring flow and production in deepwater environments. In *Paper OTC-11035, presented at the 1999 Offshore Technology Conference*, Houston, Texas.
- Saint-Marcoux, J. F. e Kennedy, B. F. (2002). Functional approach to flow assurance applied to deepwater field development. *Paragon Engineering*.
- Su, J. (2003). Flow assurance of deepwater oil and gas production — a review. In *Proceedings of 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE'03)*, Cancun, Mexico.
- Su, J., Cerqueira, D. R., e Estefen, S. F. (2003). Thermal analysis of sandwich pipes with active electrical heating. In *Proceedings of 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE'03)*, Cancun, Mexico.
- Su, J., Cerqueira, D. R., e Estefen, S. F. (2005). Simulation of transient heat transfer of sandwich pipes with active electrical heating. *Trans. ASME J. Offshore Mech. Artic Eng.*, 127:366–370.

## Piecewise Electrical Heating System of Pipelines for Deepwater Oil and Gas Production

**Deise Helena Kullmann**

Nuclear Engineering Program, COPPE  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
CP 68509, Rio de Janeiro, CEP 21945-970, Brasil  
dkullmann@con.ufrj.br

**Jian Su**

Nuclear Engineering Program, COPPE  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
CP 68509, Rio de Janeiro, CEP 21945-970, Brasil  
sujian@con.ufrj.br

**Abstract.** In this paper, we present a composite pipeline system with piecewise active electrical heating for the production of oil and gas in deep and ultra deep waters. The flow assurance requirements and the necessity for actively heated pipelines are discussed first. A global heat balance analysis is carried out of typical deepwater pipelines for oil and gas production, which shows that active heating is necessary for long pipelines due to technical limitations of passive thermal insulation systems. The method of combined active heating and passive insulation is then considered, in which the active heating is provided by electrical resistance on the inner steel pipe. We propose here a heating method that minimises the power requirement for a given minimum temperature of produced fluid. Numerical results show significant reduction in power requirement can be achieved. Finally, an electrical system is proposed for the implementation of the optimized active heating.

**Keywords:** Flow assurance, active electrical heating, thermal analysis.