

## 9 Conclusões e Sugestões

### 9.1. Conclusões

Pode-se concluir ao término das simulações, os objetivos traçados no início deste trabalho, foram plenamente atingidos, na promoção de uma comparação entre sistemas produtivos utilizando completação seca e molhada, de forma a identificar as principais vantagens de cada um e possíveis cenários de aplicação no desenvolvimento de campos de petróleo em águas profundas.

As análises desenvolvidas mostram que a temperatura do fluido durante a produção, é afetada por vários eventos: a transferência de calor para a água do mar através do isolamento dos dutos, a queda de pressão (efeito Joule-Thomson) devido ao atrito do fluido durante o escoamento e mudança de elevação.

#### **Troca de calor com o meio ambiente**

Este efeito é mais relevante no trecho *flowline*, com completação molhada, onde a tubulação fica exposta a temperaturas muito baixas, no fundo do mar. Cabe ressaltar que a velocidade de escoamento do fluido, exerce papel relevante na troca de calor com o meio ambiente, pois quanto menor for a velocidade, maior será o tempo de exposição às baixas temperaturas, proporcionando tempo para troca térmica e conseqüentemente maior será a perda de calor do fluido.

Ao final da vida produtiva do reservatório, o aumento da produção de água e conseqüente elevação do peso da coluna de fluido exercem grande efeito sobre o diferencial de pressão na região produtora, resultando em queda de vazão. Com a redução da velocidade de escoamento do fluido, aumenta o tempo de troca térmica entre fluido, tubulação e meio ambiente.

Este fenômeno pode ser explicado através da análise de Dittus Boelter, onde verificamos que o coeficiente de transferência de calor por convecção no interior do tubo é função da vazão mássica elevada ao expoente 0,8 (Equação 81).

$$h_i = \frac{\bar{k}}{d_i} 0,023 \left( \frac{\bar{\rho} d_i}{\bar{\mu}} \right)^{0,8} \left( \frac{\bar{\mu} c_p}{\bar{k}} \right)^{0,3} \left( \frac{4}{\bar{\rho} \pi d_i^2} \right)^{0,8} \dot{m}^{0,8} \quad (81)$$

Onde:

$h_i$  = coeficiente de transferência de calor por convecção no interior do tubo

$d_i$  = diâmetro interno da tubulação

$\bar{k}$  = condutividade térmica média do fluido interno

$\bar{\mu}$  = viscosidade dinâmica média do fluido no interior da tubulação

$\bar{c}_p$  = calor específico médio do fluido no interior da tubulação

$\dot{m}$  = vazão mássica

Por outro lado, em uma análise simplificada do processo de transferência de calor entre o fluido interno e o fluido externo à tubulação, quando consideramos somente a parcela referente ao processo interno de convecção, verificamos que tanto a vazão mássica, quanto o coeficiente médio de transferência de calor por convecção no interior do tubo, apresentam expoente unitário, dentro do termo exponencial, conforme apresentado na Equação 82.

$$T_2 = \frac{T_1 - T_e}{\exp\left(\frac{2\pi r \bar{h}_i L}{\dot{m} \bar{c}_p}\right)} + T_e \quad (82)$$

Onde:

$T_1$  = Temperatura do fluido na entrada da tubulação

$T_2$  = Temperatura do fluido na saída da tubulação

$T_e$  = Temperatura do fluido externo à tubulação

$L$  = Comprimento da tubulação

$\bar{h}_i$  = coeficiente médio de transferência de calor por convecção no interior do tubo

$\dot{m}$  = vazão mássica

$\bar{c}_p$  = calor específico médio do fluido no interior da tubulação

Assim, quando a vazão mássica sofre uma determinada variação, o coeficiente médio de transferência de calor por convecção no interior da

tubulação, é afetado pela mesma variação, elevada a um expoente 0,8. Logo, o aumento da vazão mássica resulta na redução da temperatura do fluido na saída da tubulação e vice-versa.

Na completação seca, associado ao efeito de isolamento térmico provocado pela configuração do anular, o meio externo no trecho enterrado apresenta temperaturas mais elevadas, gerando menor diferencial de temperatura entre o meio externo à tubulação e o fluido e conseqüentemente, menor troca de calor.

No trecho *riser*, dependendo do sistema de isolamento do duto, a redução da temperatura associada a perdas térmicas para o ambiente é com frequência desprezível, comparada com a queda de temperatura associada ao despressurização do gás e a mudança de elevação.

### **Queda de pressão do fluido**

Para toda queda de pressão do fluido está associada uma variação de temperatura. O impacto desta variação depende da relação de óleo e de gás presentes no fluido produzido, da queda de pressão e da pressão de saída ao nível da plataforma. Normalmente, a expansão do gás originalmente dissolvido no óleo tende a esfriar o fluido (efeito Joule-Thomson), enquanto o atrito gerado pelo fluido escoando no sistema de produção, tende a provocar um pequeno aquecimento. No início da vida produtiva do reservatório, quando a vazão é maior, o efeito do atrito na variação de temperatura também é maior, principalmente no trecho soterrado, onde é menor a troca de calor com o meio ambiente, que apresenta temperaturas mais elevadas.

Entretanto, nas configurações estudadas, o impacto na temperatura do fluido, gerado pela expansão do gás, é normalmente predominante. Este fenômeno pode ser bem percebido no trecho *riser*, onde ocorre maior queda de pressão devido à redução da coluna hidrostática.

A queda de temperatura associada à despressurização de gás é significativamente maior nos óleos mais “leves”, onde a RGO é maior.

### **Elevação**

A energia potencial é definida pela altura (profundidade de água + espessura dos sedimentos) que separa o reservatório e unidade de produção. A queda de temperatura associada à energia potencial pode ser muito penalizante,

particularmente para o fluido onde a temperatura de reservatório é baixa (ao redor 50°C) como nos “fluidos pesados”. Nada pode impedir que esta perda de energia aconteça.

**Escolha do tipo de completação**

Os resultados das simulações nos três cenários mostram que a completação seca apresenta sensíveis vantagens em termos de isolamento térmico e perda de carga. Porém, a completação molhada permite que sejam atingidos objetivos (áreas de produtoras) mais distantes da unidade de produção.

O gráfico a seguir, promove a comparação entre as vazões obtidas nas configurações com completação seca e molhada, para mesmos valores de afastamento

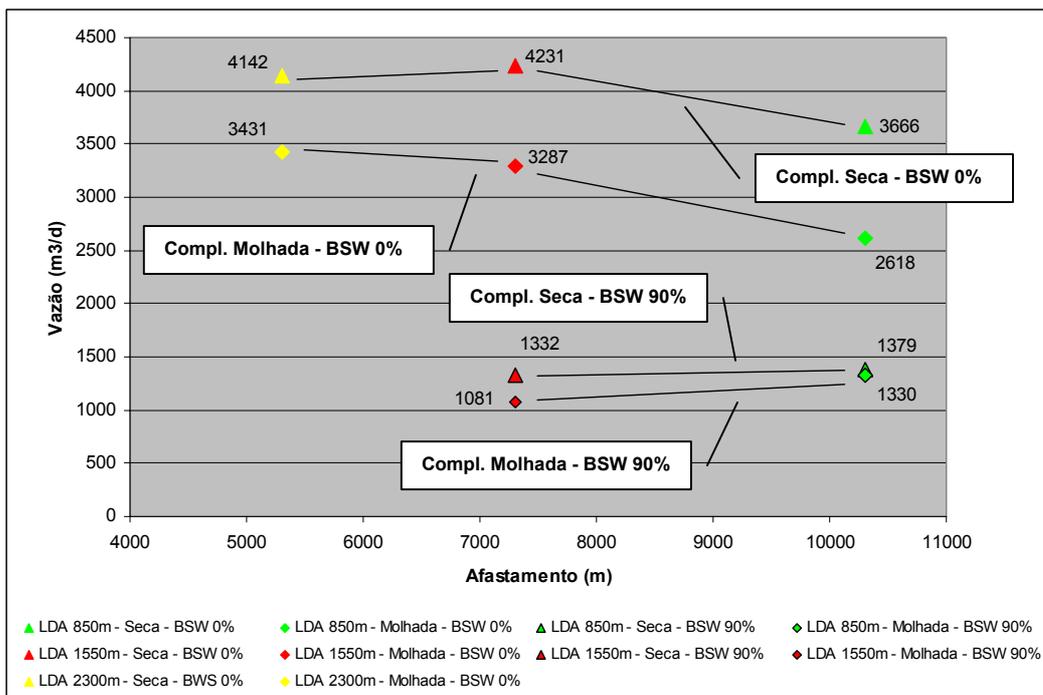


Figura 55- Vazões obtidas nos diversos cenários

Pode-se observar que o sistema com completação seca oferece vantagem, com relação à vazão, quando comparado com uma sistema utilizando completação molhada, para um mesmo afastamento. Esta vantagem deve-se principalmente ao melhor isolamento térmico, gerando menor queda de temperatura do fluido produzido e conseqüente redução de viscosidade, reduzindo a perda de carga

gerada pelo atrito. Estas variações de temperatura, podem ser observadas na Figura 56.

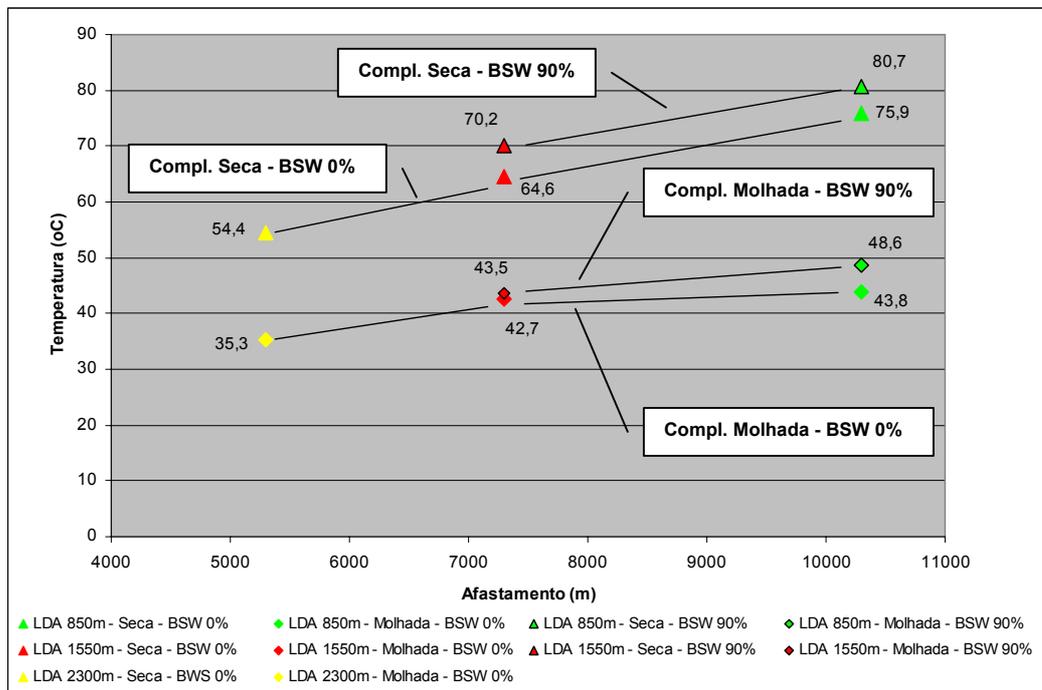


Figura 56- Temperaturas obtidas nos diversos cenários (ao nível da plataforma)

A Figura 57 reúne os resultados obtidos nas simulações com completação seca e molhada com afastamento “máximo”, possibilitando a comparação entre as distâncias atingidas por cada tipo de completação e os respectivos valores de vazão.

Nesta figura pode-se observar que embora a configuração com completação molhada e afastamento “máximo”, apresente uma redução na vazão, da ordem de 20%, esta configuração permite que se atinja afastamentos entre 80% e 120% maiores que os afastamentos tecnicamente viáveis com o uso da completação seca, possibilitando a drenagem de áreas mais extremas do reservatório.

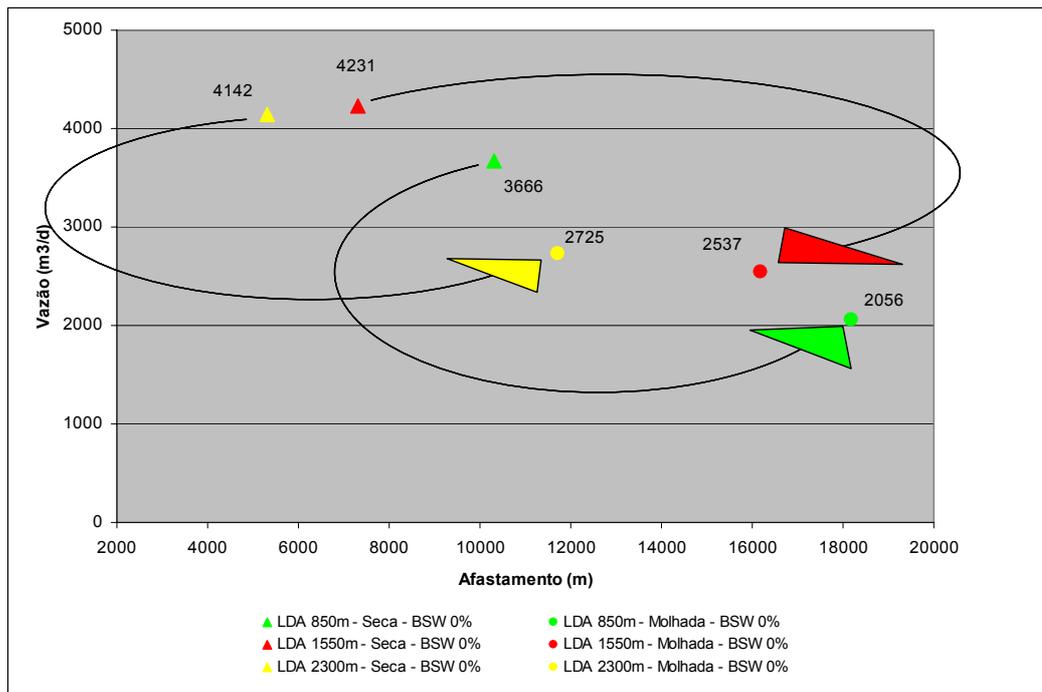


Figura 57- Vazão versus afastamento nos diversos cenários

Destaca-se que, no final da vida produtiva do reservatório localizado a 3.200 m com uma lâmina de água de 2.300 m, quando a produção de água é acentuada (BSW de 90%), nenhuma das configurações permitiu a continuidade da produção sem a utilização de um método de elevação artificial, tanto com completção seca quanto com completção molhada. Estes resultados sinalizam que a produção de petróleo em águas ultra-profundas estará sempre dependente da utilização de métodos de elevação artificial (“gas lift”, BCS e outros) para um desenvolvimento economicamente atrativo, destes campos. Por outro lado, devido à perda de calor gerada pela expansão do gás dissolvido e do gás livre, principalmente quando aplicado o “gas lift”, o sistema de bombeio centrífugo submerso (BCS) desponta como forte candidato a ter sua utilização intensificada, restringindo a adoção do “gas lift”. Entretanto, tal fato dependerá do sucesso da indústria em disponibilizar equipamentos de bombeio centrífugo submerso confiáveis, minimizando os tempos de parada da produção para reparo destes equipamentos.

A necessidade de contornar os problemas gerados pelo gás presente na produção de petróleo, principalmente em águas ultra-profundas, poderá promover oportunidades para a aplicação de outras soluções tecnológicas, tais como a de utilização de aquecimento nos trechos *riser*, para evitar que a temperatura do

fluido fique abaixo da temperatura de aparecimento de cristais de parafina, bem como de formação de hidratos.

## **9.2. Sugestões para Extensão do Trabalho**

Tendo em vista os campos de petróleo marítimos estão sendo encontrados em águas cada vez mais profundas com impactos substanciais no custo de desenvolvimento das jazidas, e baseado nas conclusões deste trabalho, acredita-se que seria de grande valor o desenvolvimento de trabalhos futuros, tanto na área técnico - científica, quanto na área econômica. Assim, alguns temas são sugeridos abaixo, visando à compreensão de tecnologias existentes para produzir de forma economicamente vantajosa, jazidas em águas profundas:

- Avaliação das conseqüências das variações dos demais parâmetros que caracterizam o fluido produzido (i.e., BSW, RGO, densidade do óleo), juntamente com a variação das características dos dutos de escoamento (i.e., diâmetro, isolamento, rugosidade) e o reflexo na temperatura e pressão ao longo do sistema.
- Incorporação de métodos de elevação artificial, avaliando seus pontos positivos e negativos, no que tange a temperatura e vazão do fluido produzido ao nível da plataforma.
- Avaliação econômica de campos em águas profundas desenvolvidos com o emprego de completção seca versus molhada.