

7 Resultados

7.1 Validação modelo simplificado

De acordo com os dados de entrada e da metodologia de cálculo alguns resultados foram extraídos das análises. Primeiramente um comparativo entre o modelo realizado pelo programa PipeSim e o programa desenvolvido no software MathCad e o programa *black oil* será apresentado para fins de validação.

Percebe-se no gráfico abaixo resultados muito próximos entre os três modelos, sendo a ferramenta MatchCad um ótimo recurso para uma análise simplificada de um escoamento multifásico por ser um software mais acessível. O erro encontrado entre o programa deste trabalho e o programa Pipesim é no máximo 3,0%, enquanto o erro entre o modelo simplificado e o programa *black oil* é de no máximo 3,5%. Para fins de validação foram analisados 3 casos diferentes, englobando as correlações de Beggs & Brill, Hagedorn & Brown e o modelo monofásico. Nestes modelos foram considerados ângulos de 10 a 80 graus. O modelo elaborado neste trabalho está apresentado no apêndice D e brevemente descrito no próximo parágrafo.

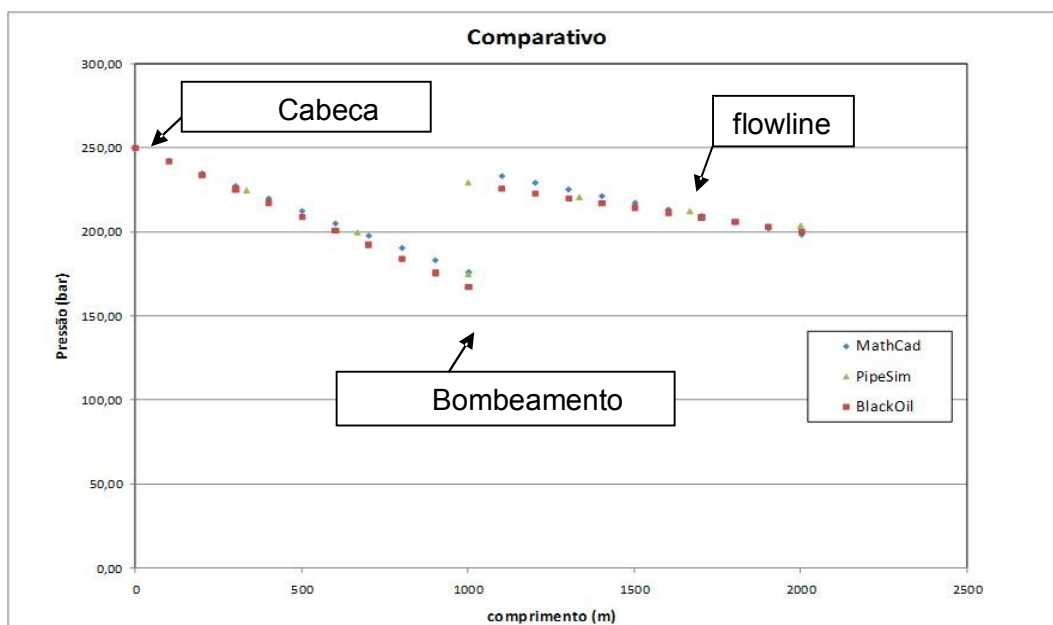


Figura 7-1: Comparativos de resultado entre os modelos deste trabalho para fim de validação do modelo MathCad

O programa consiste em analisar a queda de pressão de um fluido em um escoamento multifásico através de um modelo homogêneo, a correlação de Beggs & Brill ou a correlação de Hagedorn & Brown. Qualquer inclinação e comprimento de linha podem ser utilizados.

Como dados de entrada deste programa é necessário a definição das características do fluido no ponto inicial do escoamento, tais como, pressão, temperatura, vazão de líquido e densidade do óleo, por exemplo. Definição das características do sistema, tais como, diâmetro, espessura, angulação e comprimento de linha, e da correlação que será considerada. A figura abaixo ilustra a página de dados de entrada deste programa.

Dados de entrada:

Característica do fluido:

Pressão estática inicial

$$P := 90 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Overall heat transfer coefficient

$$U1 := 0.5 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Temperatura inicial

$$T := 80^\circ\text{C}$$

Densidade do gás std:

$$d_g := 0.75$$

Vazão de líquido

$$q_L := 50 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

massa específica do ar:

$$\rho_{\text{ar}} := 0.0761 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3}$$

Razão água líquido:

$$\text{BSW} := 10\%$$

Condutividade térmica do revestimento

$$k_{\text{iso}} := 0.024 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Razão gás-Líquido

$$\text{RGL} := 120 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$$

Espessura de revestimento:

$$t_{\text{iso}} := 50.8 \text{mm}$$

API do óleo:

$$\text{API} := 20$$

Característica da bomba:

Pressão diferencial da bomba:

$$\Delta P_{\text{bomba}} := 30 \text{bar}$$

Localização da bomba:

$$L_{\text{bomba}} := 1000 \text{m}$$

Característica do separador:

Eficiência do separador:

$$\Theta := 100\%$$

Eficiência da bomba:

$$\Omega = 1$$

Característica do duto:

Numero de seções:

$$n := 4$$

Seção	1	2	3	4
Diametro Externo duto liq. (in)	9	9	9	9
Diametro Externo duto gas. (in)	9	9	9	9
Espessura de Parede (in)	0.5	0.5	0.5	0.5
Massa específica do aço (kgf/m ³)	7850	7850	7850	7850
Comprimento de duto (m)	500	500	500	500
Ângulo em relação horizontal	80	80	80	80
Temperatura água do mar	4	4	4	4
Correlação	Hagdon & Brown ▾	Hagdon & Brown ▾	Hagdon & Brown ▾	Hagdon & Brown ▾

Incremento de cálculo:

$$\Delta L := 100 \text{m}$$

Figura 7-2: Ilustração da página de dados de entrada do modelo gerado em Mathcad

A partir da definição dos dados de entrada o programa define um valor de pressão para o ponto final do incremento de espaçamento pré definido. A partir daí a temperatura final é calculada. Assim um valor médio de temperatura e pressão é estabelecido para o incremento e a característica do fluido neste ponto será calculada pelo programa a partir deste valor. A perda de carga é então calculada baseada por uma das correlações definidas e comparado pelo programa com o valor inicial estabelecido. Caso este valor esteja dentro da tolerância definida no programa, passa-se para o incremento seguinte. Caso contrário, o cálculo é refeito considerando o novo valor de pressão calculado como o valor estimado do ponto final do incremento. Os resultados da análise de sensibilidade estão ilustrados a seguir.

7.2

Variação diâmetro interno

Variando o diâmetro interno do *flowline* percebe-se que diâmetros maiores tendem a produzir mais, devido ao maior volume transportado, porém também aumenta-se a perda de carga do sistema. Inicialmente um diâmetro de 11" foi utilizado. Porém, para os parâmetros de fluxo e comprimento de linha definidos, este fluido não possuía energia suficiente para produzir todo volume no comprimento especificado. Para as análises seguintes o diâmetro foi reduzido para 9" e assim a análise de sensibilidade pôde ser realizada. As Figuras 7-3 e 7-4 ilustram este resultado.

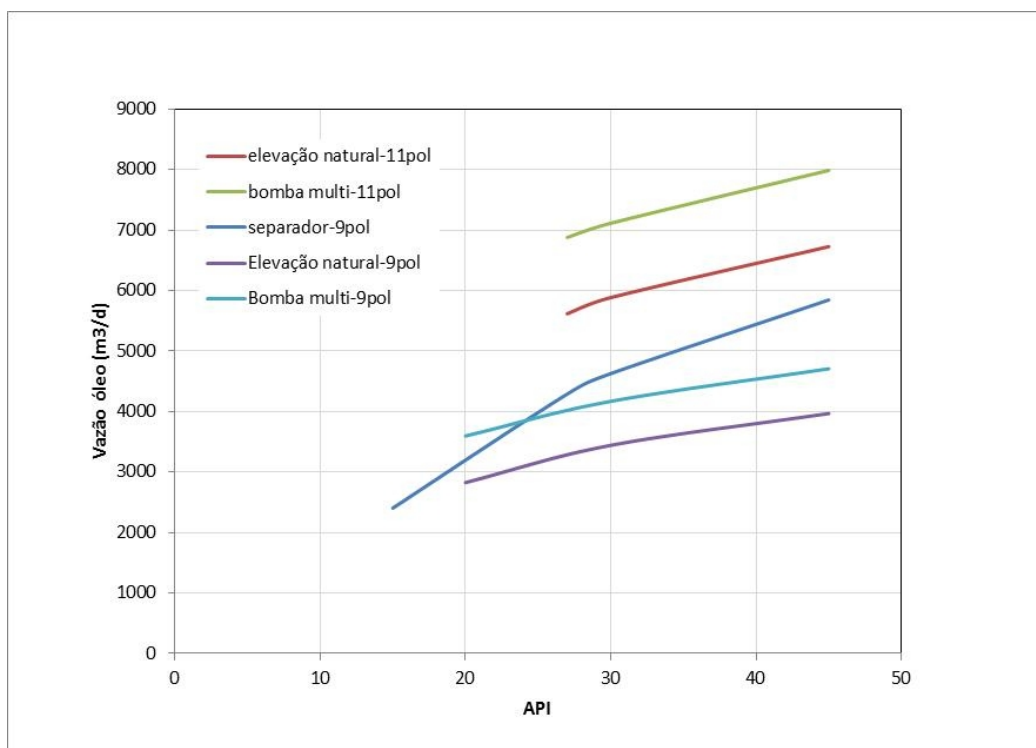


Figura 7-3: Gráfico da variação da vazão de óleo x API, variando diâmetro interno do duto para bomba, separador e elevação natural.

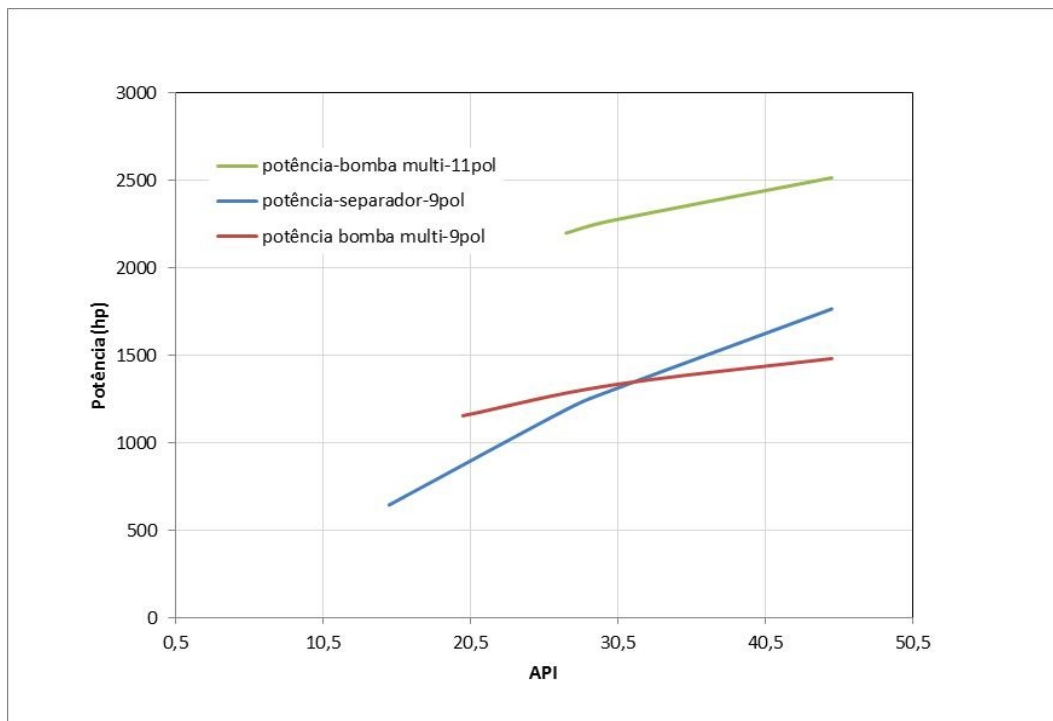


Figura 7-4: Gráfico da variação da potência requerida x API, variando diâmetro interno do duto para bomba, separador e elevação natural

7.3

Variação RGL (Razão gás/líquido)

Para o comparativo dos próximos itens será considerado a energia específica, ou seja, quanto de energia é requerida para transportar um quilo de massa. Será possível desta maneira comparar tanto a potência, quanto a vazão produzida em um mesmo parâmetro.

As Figuras 7-5 à 7-7 ilustram a energia específica das análises realizadas para a variação de RGL. Percebe-se que quanto maior a pressão de entrada, a potência requerida por unidade de massa é menor no sistema de bombeamento multifásico. Porém quanto maior o valor da RGL, mais este potencial se aproxima do potencial do separador. Ao diminuir a pressão de entrada, este potencial da bomba multifásica torna-se maior que do separador.

Pode se concluir então que para sistemas alocados na cabeça do poço (com maiores pressões de sucção) o sistema multifásico torna-se energeticamente mais eficiente, principalmente para baixos valores de RGL, pois no escoamento horizontal, quanto maior a presença de gás, maior a perda de carga por atrito.

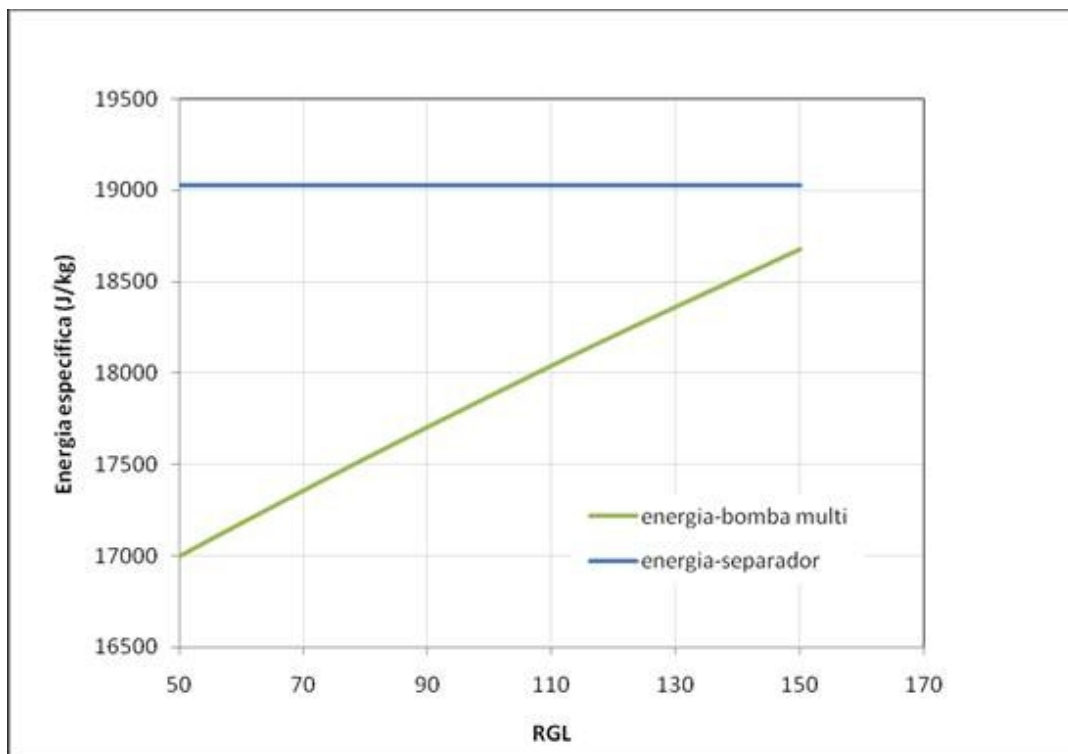


Figura 7-5: Gráfico da variação da energia específica x RGL, pressão de entrada = 150bar

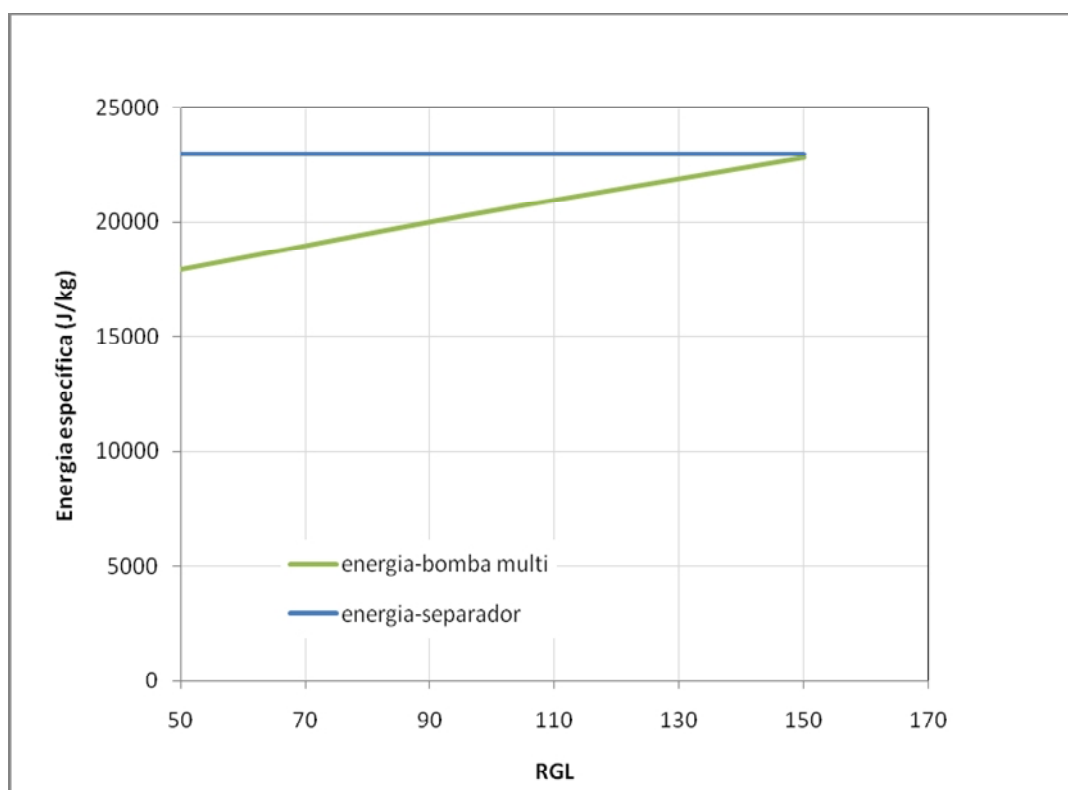


Figura 7-6: Gráfico da variação da energia específica x RGL, pressão de entrada = 75bar

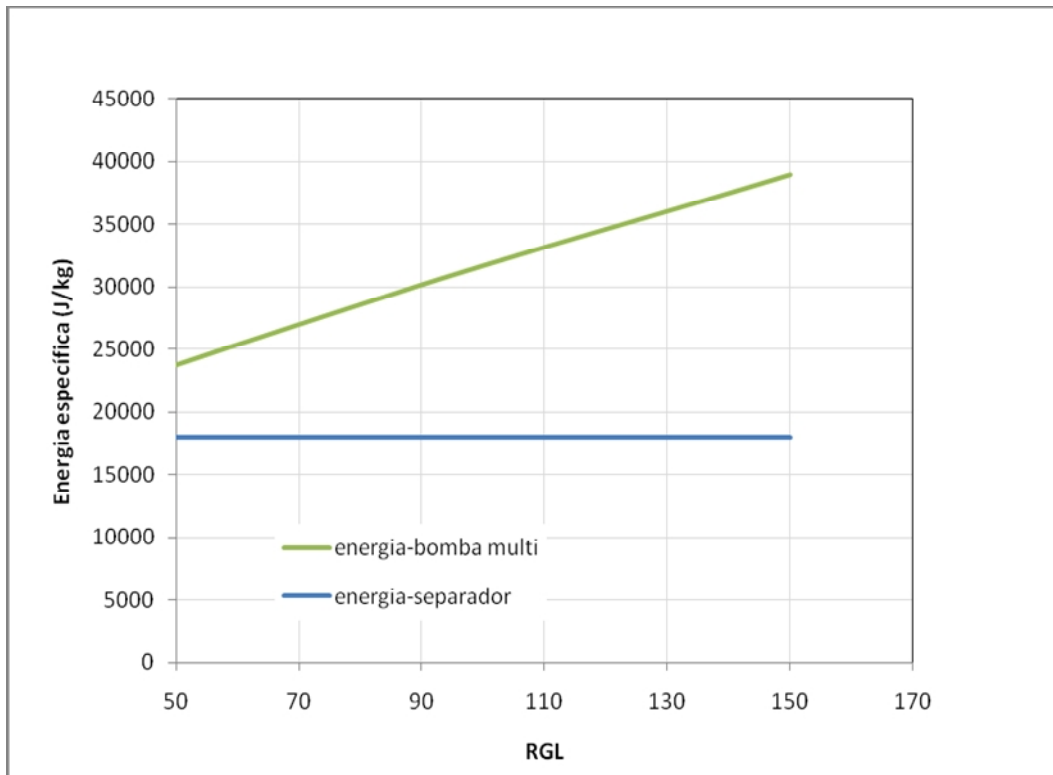


Figura 7-7: Gráfico da variação da energia específica x RGL, pressão de entrada= 25bar.

Pelos gráficos das Figuras 7-8 à 7-10 de pressão de saturação e percentual de gás (ao final do *flowline*), conclui-se que quanto menor a pressão de sucção do sistema, maior a presença de gás, o que torna o sistema de separação mais indicado. Percebe-se que a pressão de saturação se encontra abaixo da pressão de sucção apenas quando a pressão de sucção é igual ou maior que 150bar e o RGL é menor que $50\text{m}^3/\text{m}^3$. Isso significa que nestas circunstâncias não há presença de gás livre e até mesmo a bomba monofásica poderia ser uma solução para este sistema.

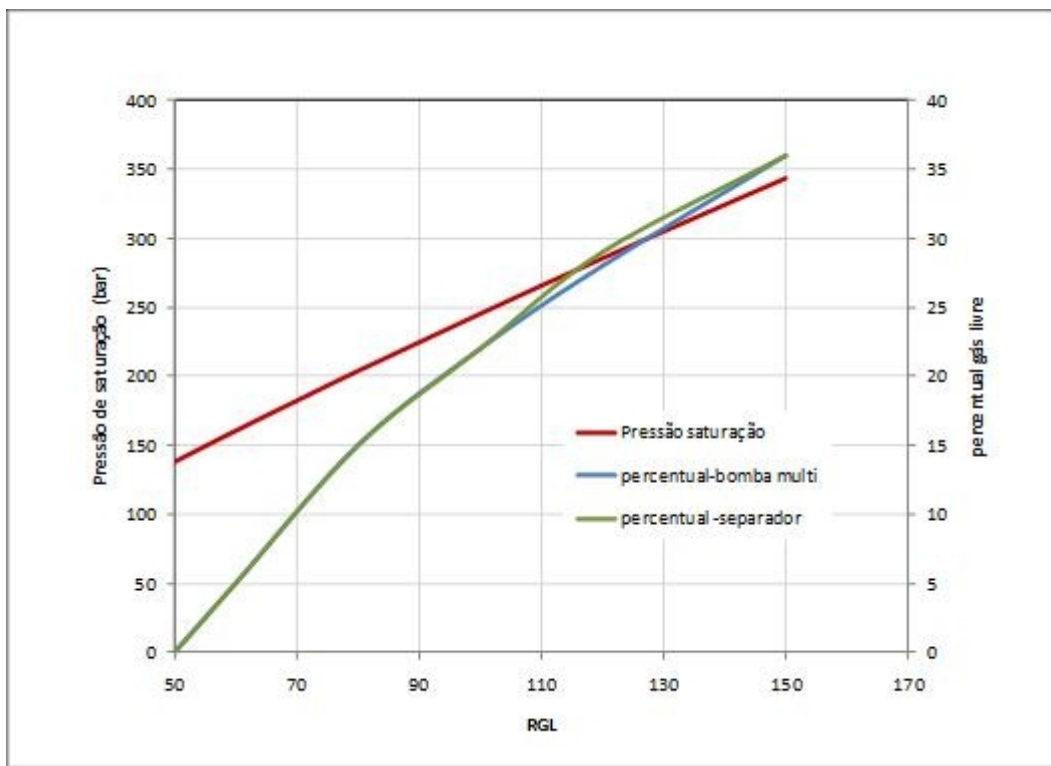


Figura 7-8: Gráfico da pressão de saturação e percentual de gás livre x RGL, pressão de entrada=150bar

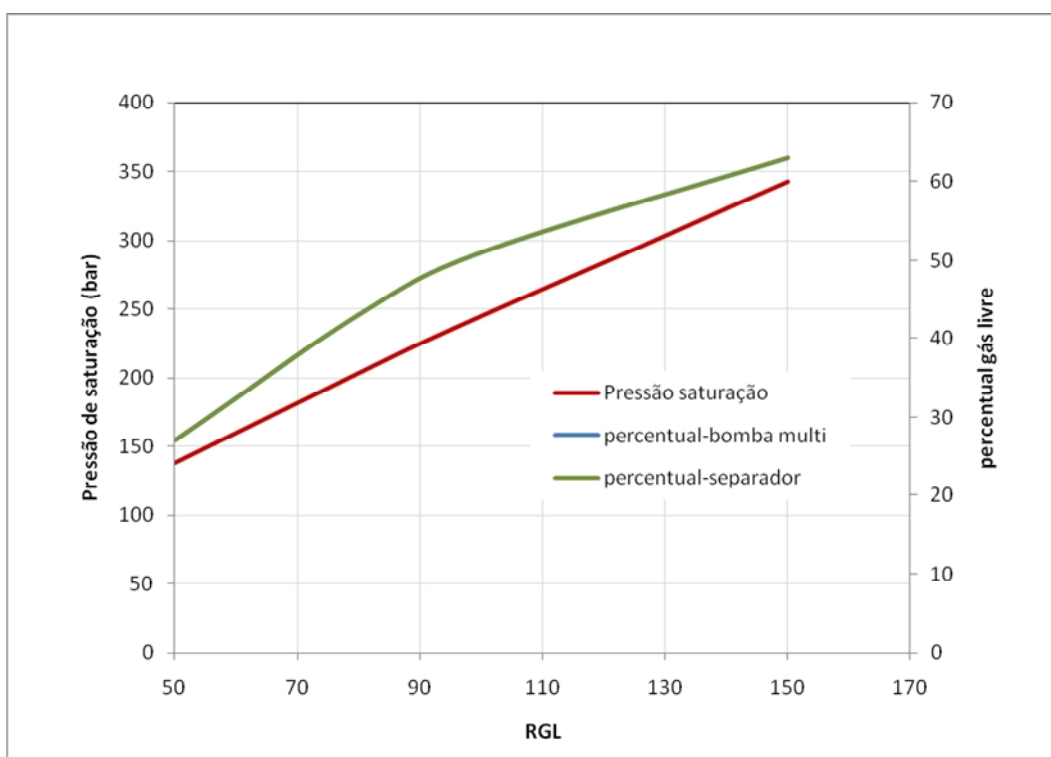


Figura 7-9: Gráfico da pressão de saturação e percentual de gás livre x RGL, pressão de entrada=75bar

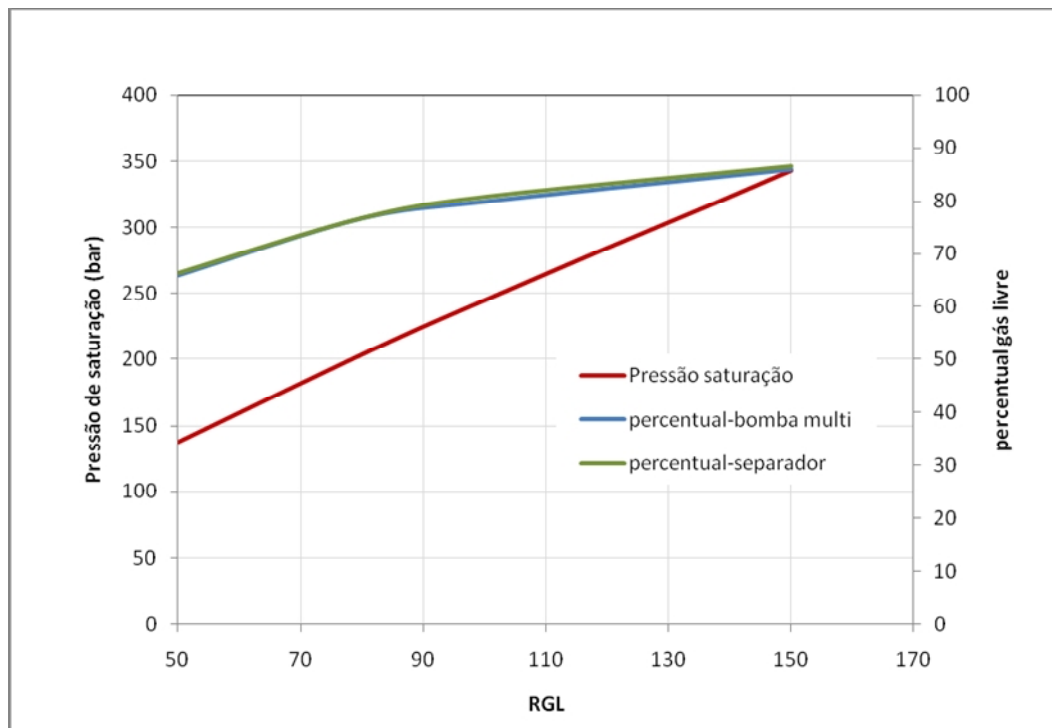


Figura 7-10: Gráfico da pressão de saturação e percentual de gás livre x RGL, pressão de entrada = 25bar

7.4 Variação API

De acordo com os resultados da variação do grau API do óleo, primeiramente a mesma conclusão da variação do RGL se observa. Quanto maior a pressão de sucção, menor o percentual de gás livre e, portanto menor a energia específica requerida da bomba multifásica. Para pequenas pressões de sucção, o separador passa a apresentar menor potencial, devido a maior presença de gás no sistema, gás este que é separado no sistema de separação antes da bomba monofásica entrar em operação. Este resultado pode ser observado nas Figuras 7-11 a 7-13.

Analisando a variação do grau API apenas, percebe-se que quanto mais leve o óleo (maior grau API) maior é a vazão de óleo, porém, também é maior a energia necessária para produção. Portanto, a energia específica cresce linearmente com o aumento do grau API do óleo.

Assim sendo, apesar do óleo mais leve permitir uma maior produção, o potencial (energia) necessário é elevado. A solução neste caso pode ser o rearranjo do sistema, diminuindo o diâmetro da linha de produção e diminuindo assim a vazão de óleo produzido.

Comparando a bomba multifásica com o separador, percebe-se que a variação do grau API não modifica a conclusão anterior, onde a bomba multifásica será melhor utilizada em maiores pressões de sucção e o separador será melhor utilizado em baixas pressões, independentemente da densidade do óleo.

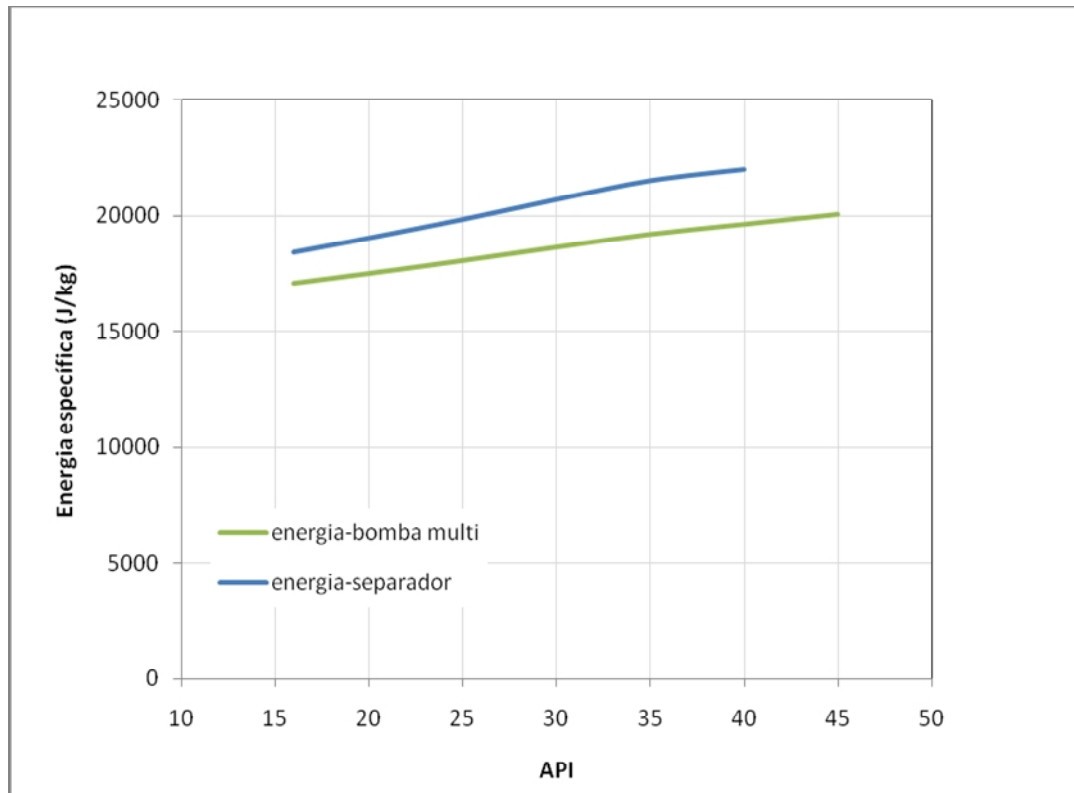


Figura 7-11: Gráfico da variação da energia específica x API, pressão de entrada=150bar

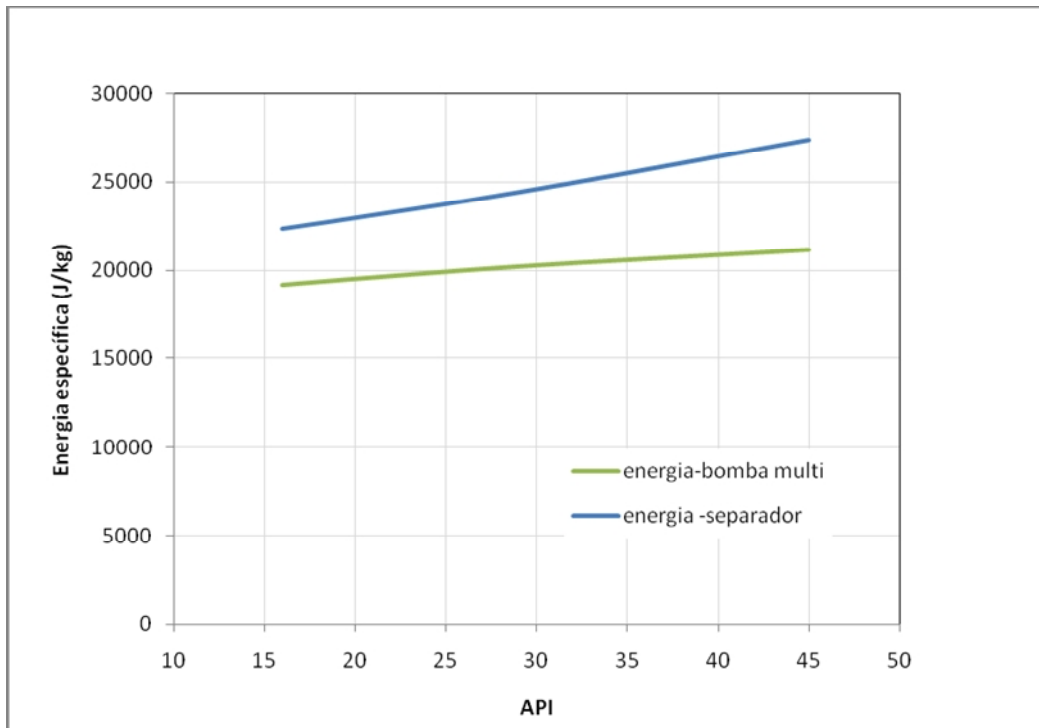


Figura 7-12: Gráfico da variação da energia específica x API, pressão de entrada=75bar

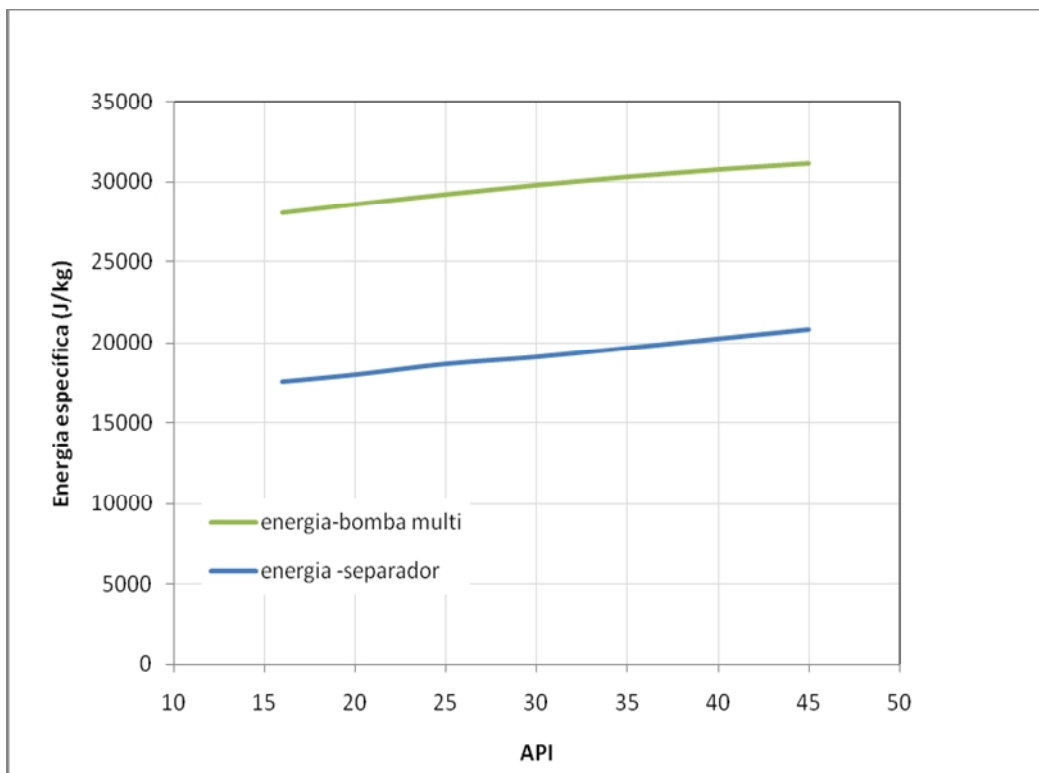


Figura 7-13: Gráfico da variação da energia específica x API, pressão de entrada =25bar

As Figuras 7-14 e 7-15 representam a pressão de saturação do sistema. Percebe-se que a pressão de saturação é menor que a pressão do sistema apenas quando a pressão de sucção é igual a 150bar e em óleos mais leves que

30^oAPI. Isso significa que nestes casos não há presença de gás na sucção da linha e, portanto uma bomba monofásica poderia ser utilizada.

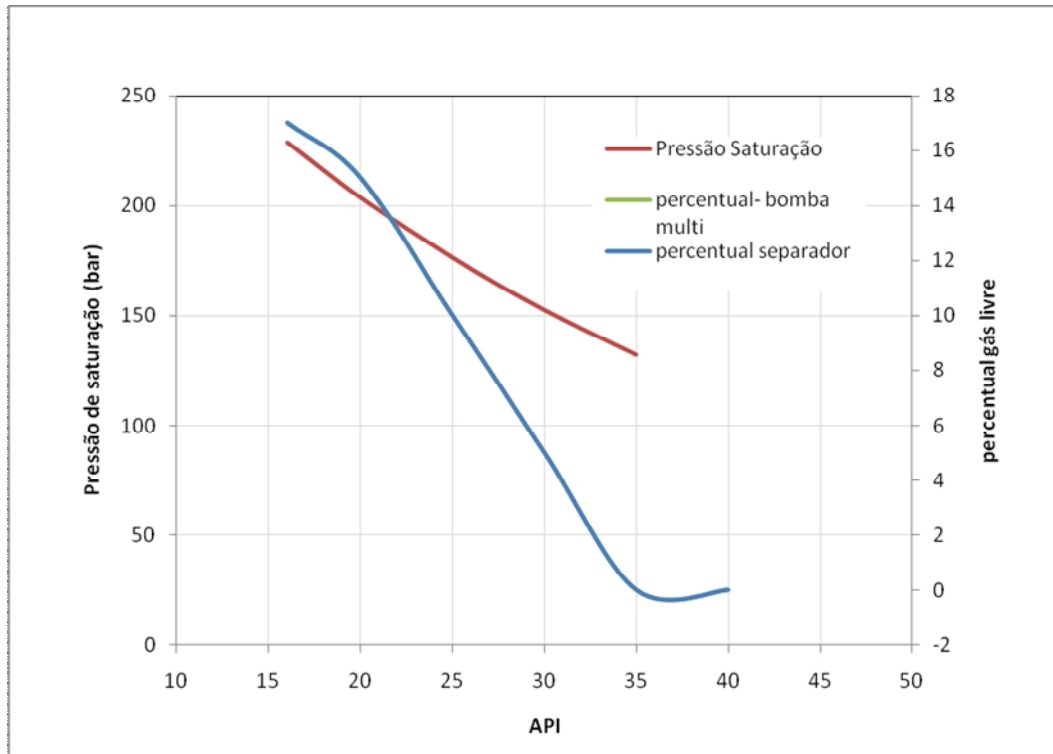


Figura 7-14: Gráfico da variação da pressão de saturação e percentual de gás livre x API, pressão de entrada=150bar

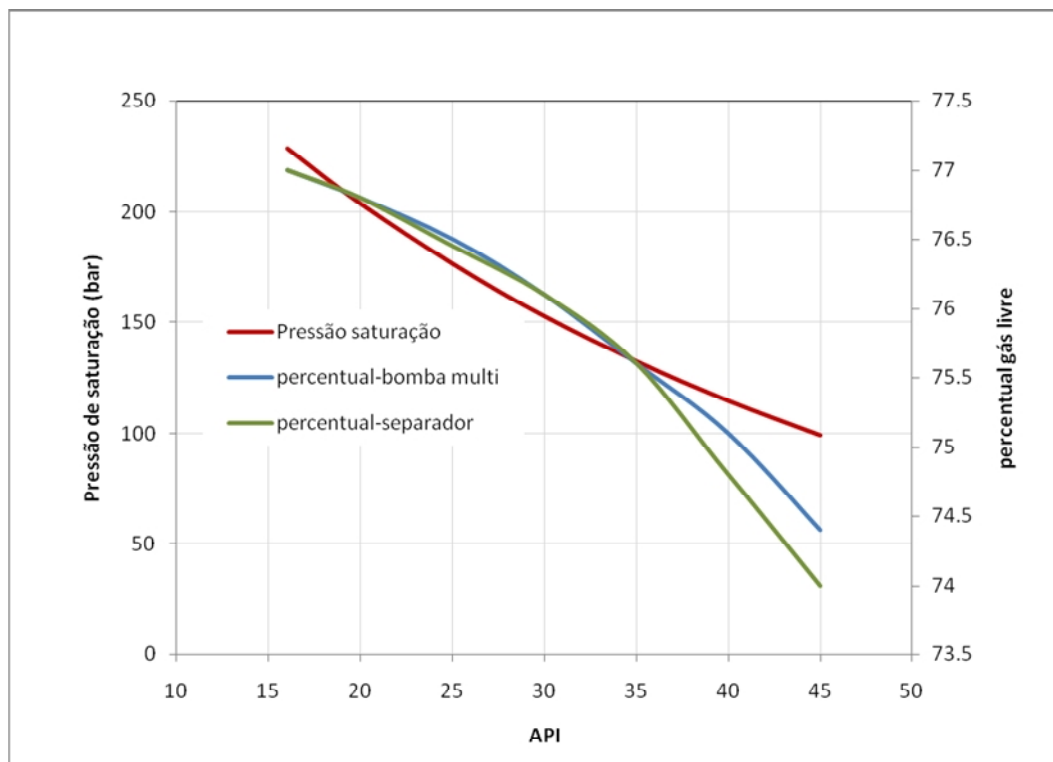


Figura 7-15: Gráfico da variação da pressão de saturação e percentual de gás livre x API, pressão de entrada = 25bar

7.5

Variação *watercut*

Assim como nos sistemas anteriores, os gráficos abaixo permitem concluir que quanto menor a pressão de sucção, menor a energia específica do separador em relação à bomba multifásica. Verificando a variação do percentual de água no sistema quanto maior a presença de água, menor a produção de óleo, porém, pouca influência se percebe na energia específica, apesar de ser claro que este potencial, ao aumentar o *watercut* está utilizando energia para escoar mais água. A solução para um sistema de alto valor de *watercut* seria a utilização de sistemas de re-injeção de água submarinos, onde seria necessário a utilização de um separador água/óleo, além do separador de gás e líquido. As Figuras 7-16 à 7-18 ilustram o resultado encontrado desta análise.

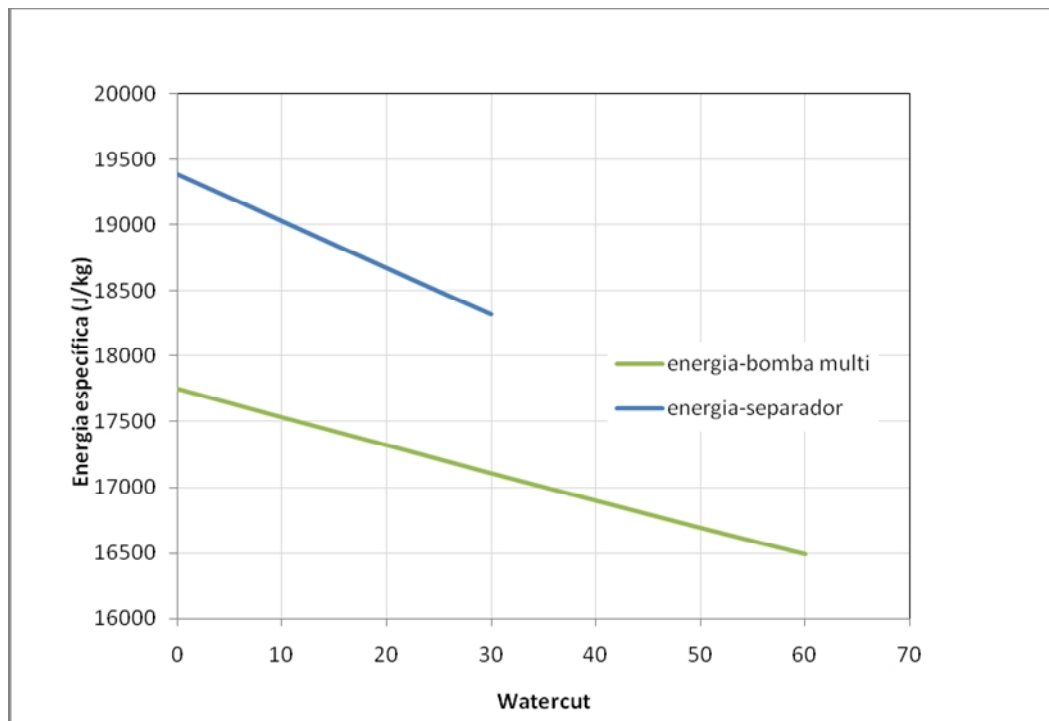


Figura 7-16: Gráfico da variação da energia específica x *watercut*, pressão de entrada = 150bar

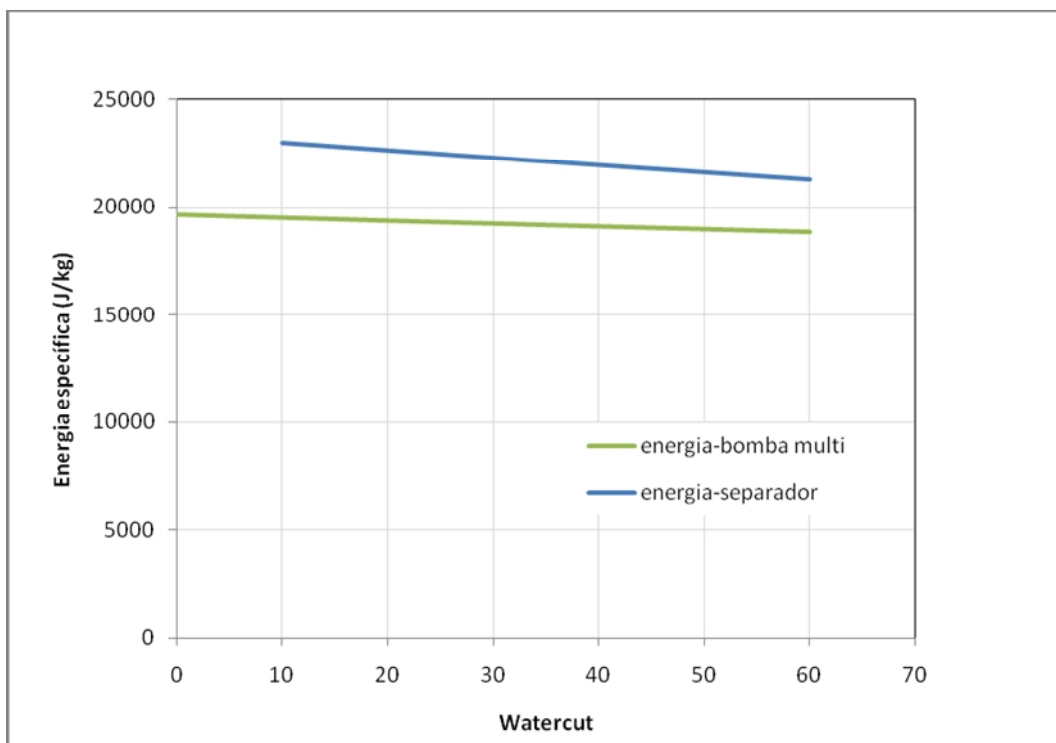


Figura 7-17: Gráfico da variação da energia específica x *watercut*, pressão de entrada=75bar

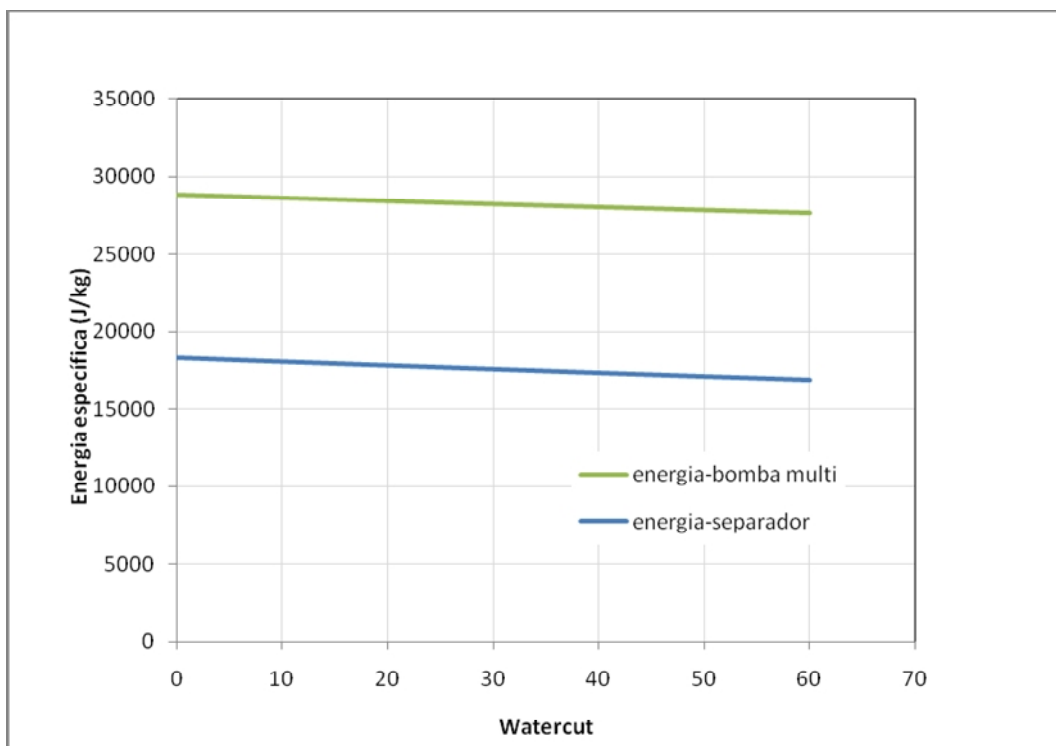


Figura 7-18: Gráfico da variação da energia específica x *watercut*, pressão de entrada = 25bar

Ao verificar a pressão de saturação, visto que a mesma é independente do valor de *watercut*, e possui um valor acima dos valores de pressão que estão

sendo analisados nestes modelos, percebe-se que a presença de gás em todos os casos estudados. Porém quanto menor a pressão de sucção, maior a quantidade de gás livre e mais vantajoso se torna o sistema de separação em relação ao bombeamento multifásico. As Figuras 7-19 e 7-20 ilustram este resultado.

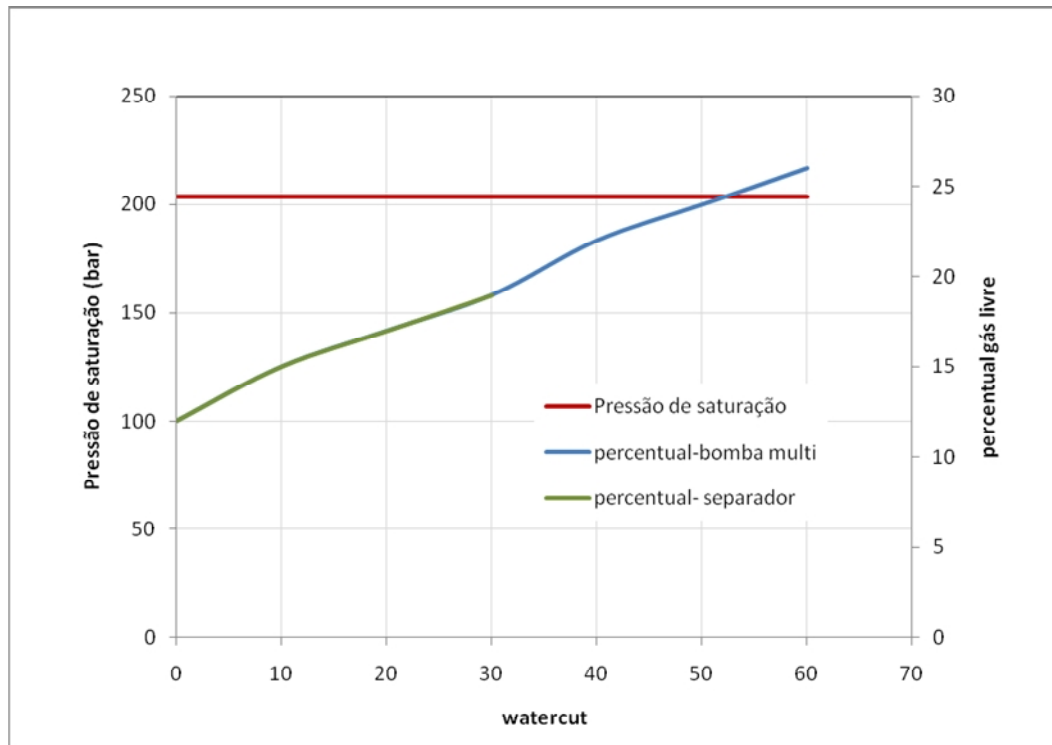


Figura 7-19: Gráfico da variação da pressão de saturação e percentual de gás x *watercut*, pressão de entrada = 150bar

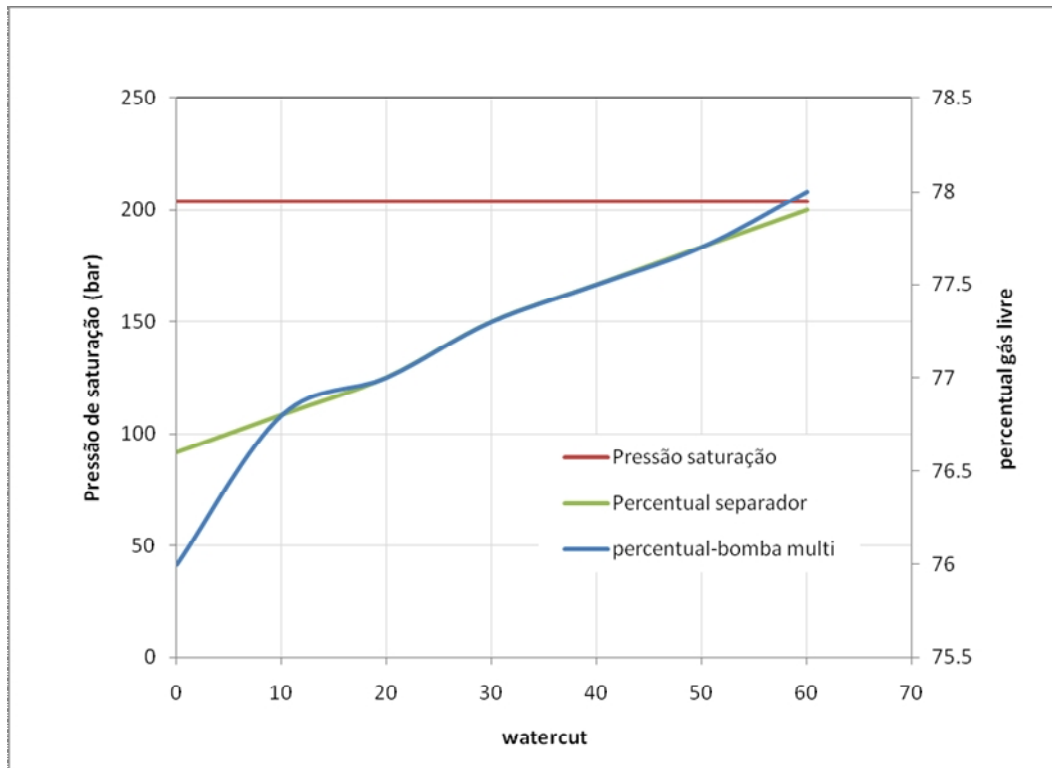


Figura 7-20: Gráfico da variação da pressão de saturação e percentual de gás x *watercut*, pressão de entrada = 25bar

7.6 Variação densidade do gás

No sistema de separação, ao separar o gás mais pesado, o volume ocupado pelo óleo aumenta, e a energia necessária para transportar o fluido se torna maior. Ao diminuir a pressão de entrada, maior a presença de gás livre e menor é o volume ocupado pelo óleo. Isso diminui a taxa de aumento do poder energético ao aumentar a densidade do gás. Ou seja, a variação da densidade do gás apresenta maior impacto em sistemas de pressão de entrada elevada.

No sistema de bombeamento multifásico, quanto mais pesado o gás, maior é a perda de carga, e menor é a vazão de óleo, tornando a energia específica menor. Para altas pressões de entrada, portanto, o bombeamento multifásico é mais vantajoso. O gás mais pesado tende a aumentar a produção de óleo no escoamento após separador e diminuir a produção de óleo e, portanto, a energia necessária, no bombeamento multifásico.

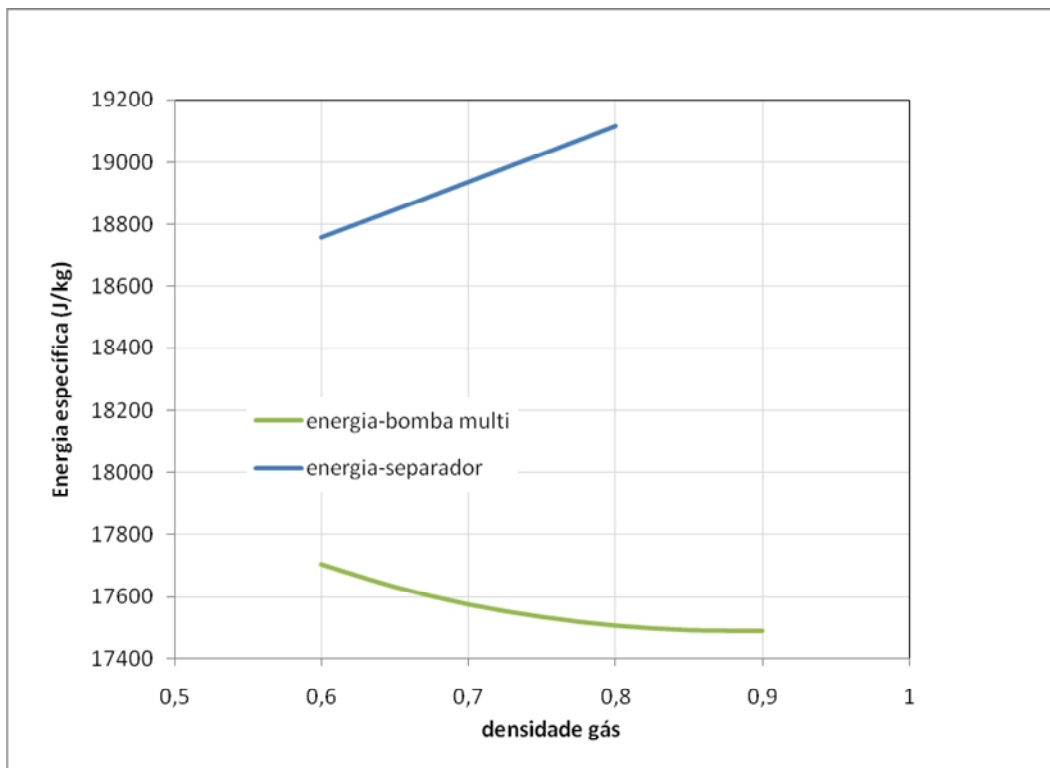


Figura 7-21: Gráfico da variação da energia específica x densidade do gás, pressão de entrada = 150bar

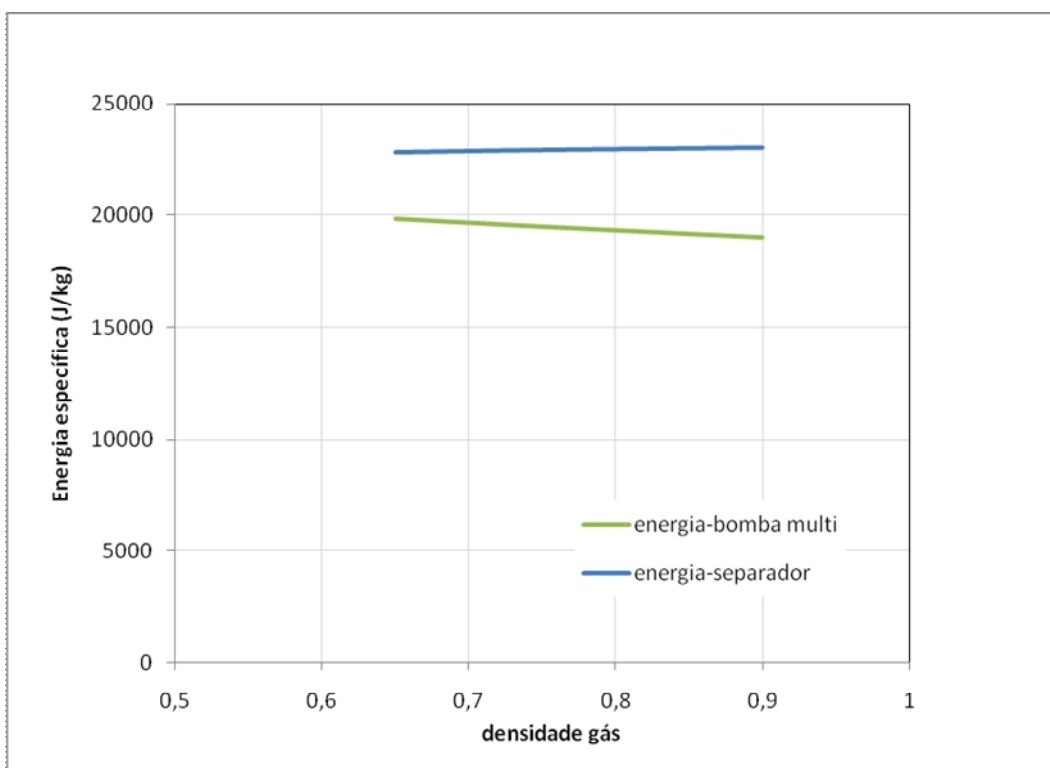


Figura 7-22: Gráfico da variação da energia específica x densidade do gás, pressão de entrada=75bar

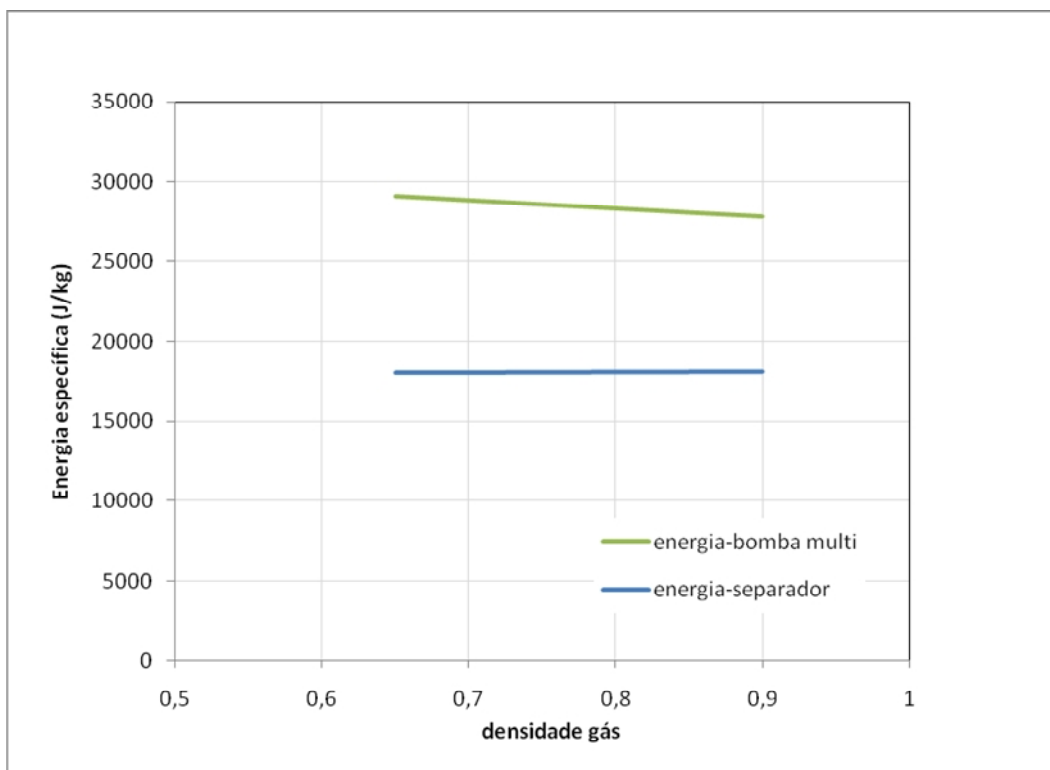


Figura 7-23: Gráfico da variação da energia específica x densidade do gás, pressão de entrada = 25bar

As Figuras 7-24 e 7-25 ilustram a pressão de saturação acima da pressão de estudo e o aumento do percentual de gás livre em baixa pressão.

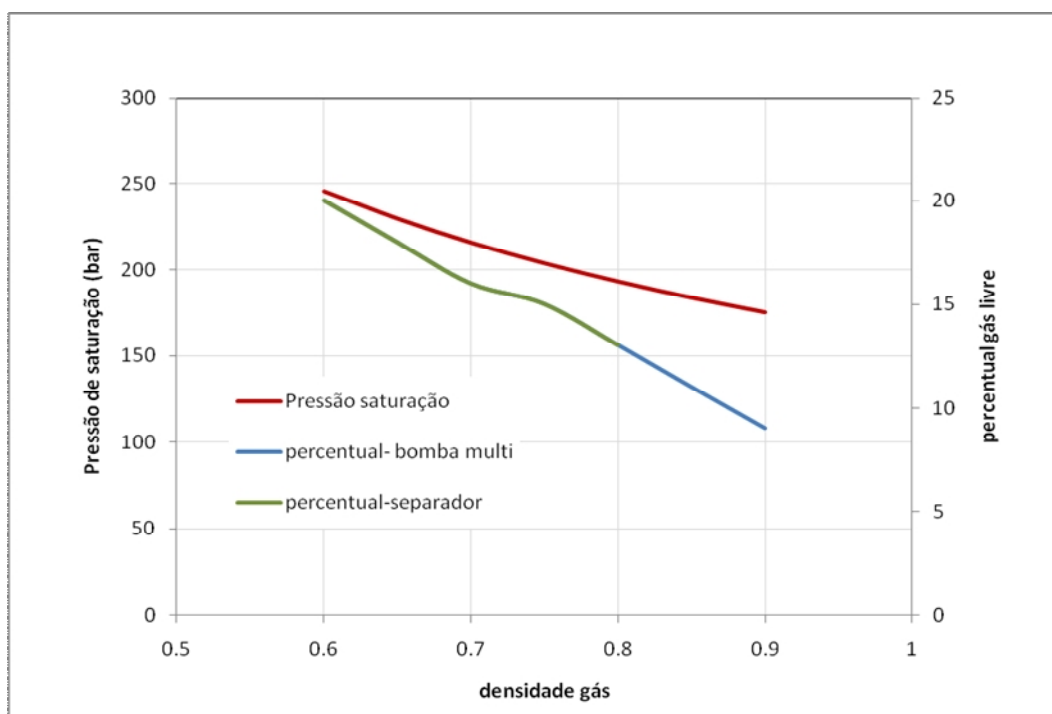


Figura 7-24: Gráfico da variação da pressão de saturação e percentual de gás livre x densidade do gás, pressão de entrada = 150bar

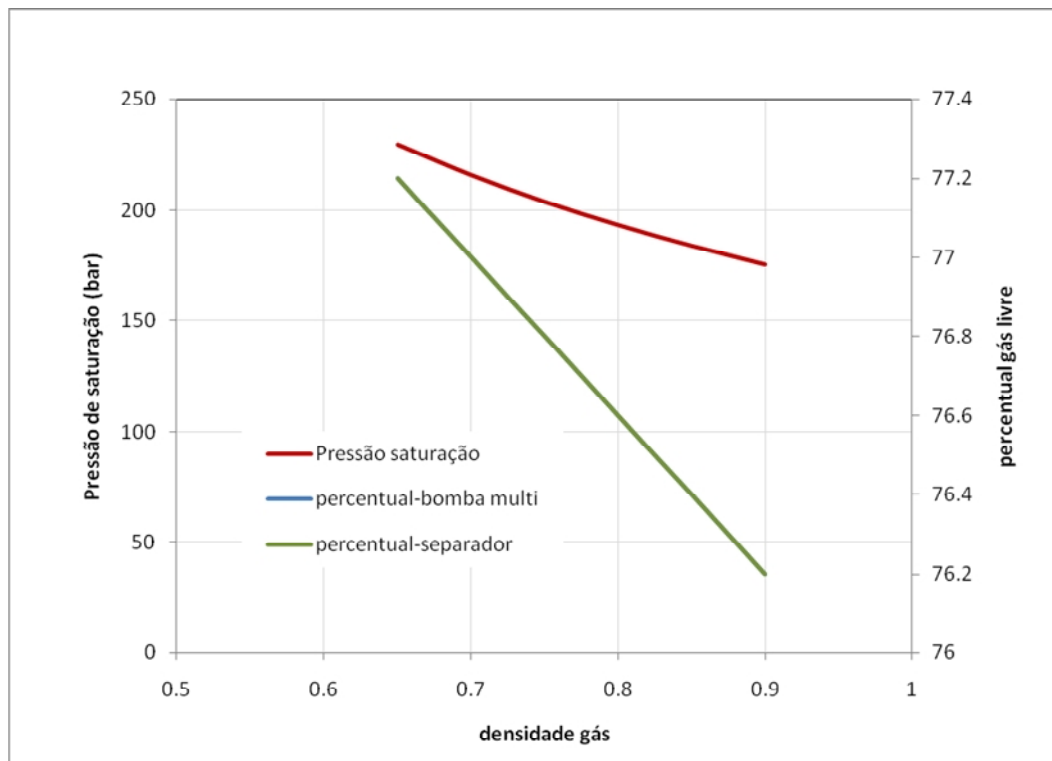


Figura 7-25: Gráfico da variação da pressão de saturação e percentual de gás livre x densidade do gás, pressão de entrada =25bar

7.7 Análise comparativa

Após a análise individual de cada parâmetro percebe-se que existe um ponto ótimo de pressão, onde abaixo deste valor o separador torna-se mais eficiente energeticamente. Existe também um ponto ótimo de energia específica onde a bomba multifásica será energeticamente mais eficiente. Para visualizar este ponto de transição e visualizar a região onde cada equipamento tem melhor desempenho energético, os gráficos seguintes são apresentados.

Observa-se analisando estes gráficos que algumas regiões podem ser mais eficientes tanto para a bomba multifásica quanto para o separador dependendo da combinação da pressão e da energia específica. Porém, algumas regiões são identificadas como exclusivamente preferencial para a bomba multifásica ou para o separador. Estes gráficos ajudam a identificar as pressões e a energia específica onde seria melhor o uso de uma bomba multifásica ou de um separador em termos energéticos para cada parâmetro estudado neste trabalho, ou seja, API, RGL, densidade de gás e *watercut*.

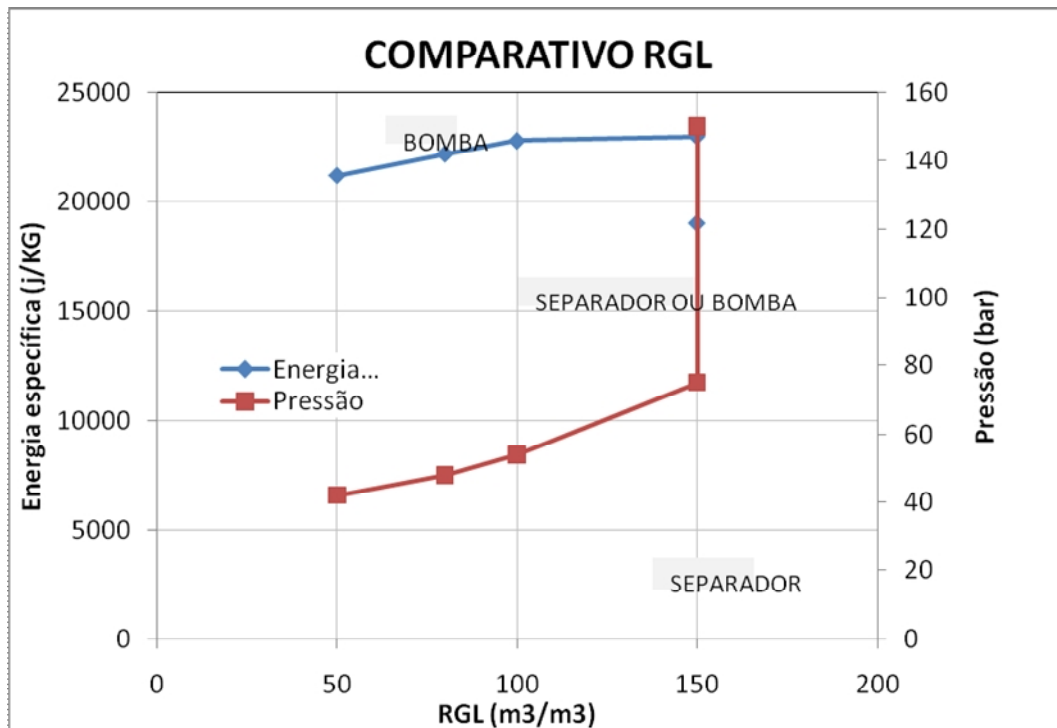


Figura 7-26: Gráfico comparativo da região de pressão e energia específica onde bomba multifásica e separador são mais eficientes observando a variação do RGL

Observando o gráfico da Figura 7-26 acima percebe-se que abaixo da linha de pressão vermelha o separador será sempre mais eficiente. Acima da linha de energia azul, a bomba multifásica será sempre mais eficiente. Na intercessão destas duas linhas, ambas as opções podem ser eficientes dependendo da combinação de pressão e energia específica. Ou seja, para baixas pressões e altos RGL, o separador é mais eficiente. O ponto exato de transição pode ser observado na figura.

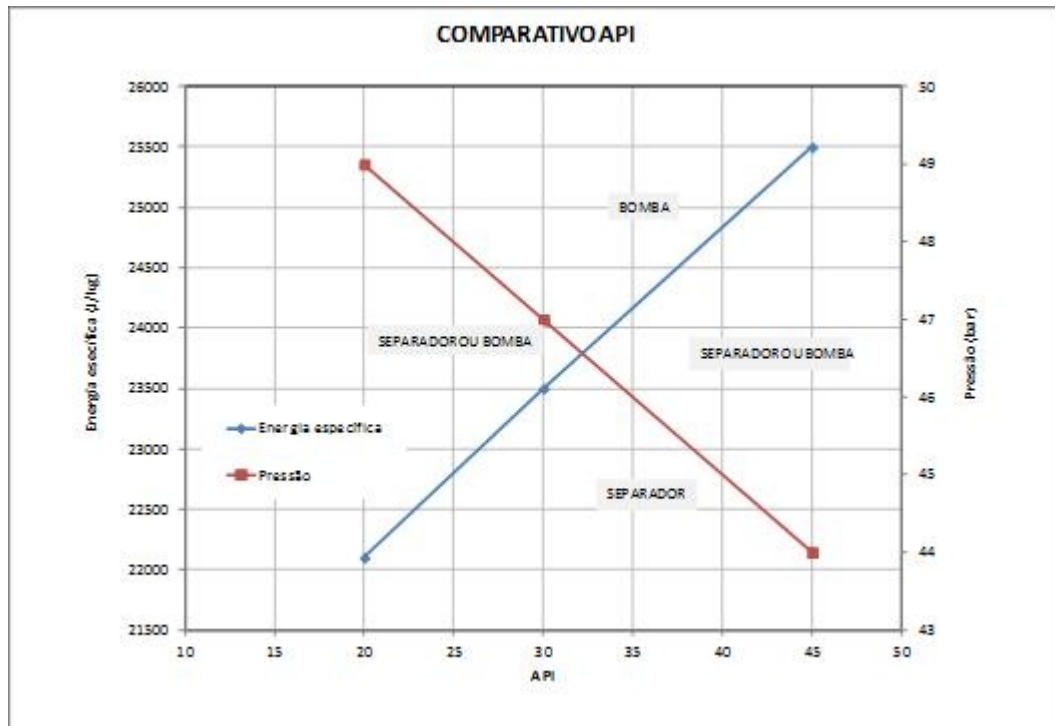


Figura 7-27: Gráfico comparativo da região de pressão e energia específica onde bomba multifásica e separador são mais eficientes observando a variação do API

Observando o gráfico comparativo entre bombas multifásicas e separadores com a variação do grau API, percebe-se a região onde o separador é mais eficiente, na parte inferior da linha de pressão, e da linha de energia. A região onde a bomba se torna mais eficiente na parte superior destas linhas, e a região de interseção.

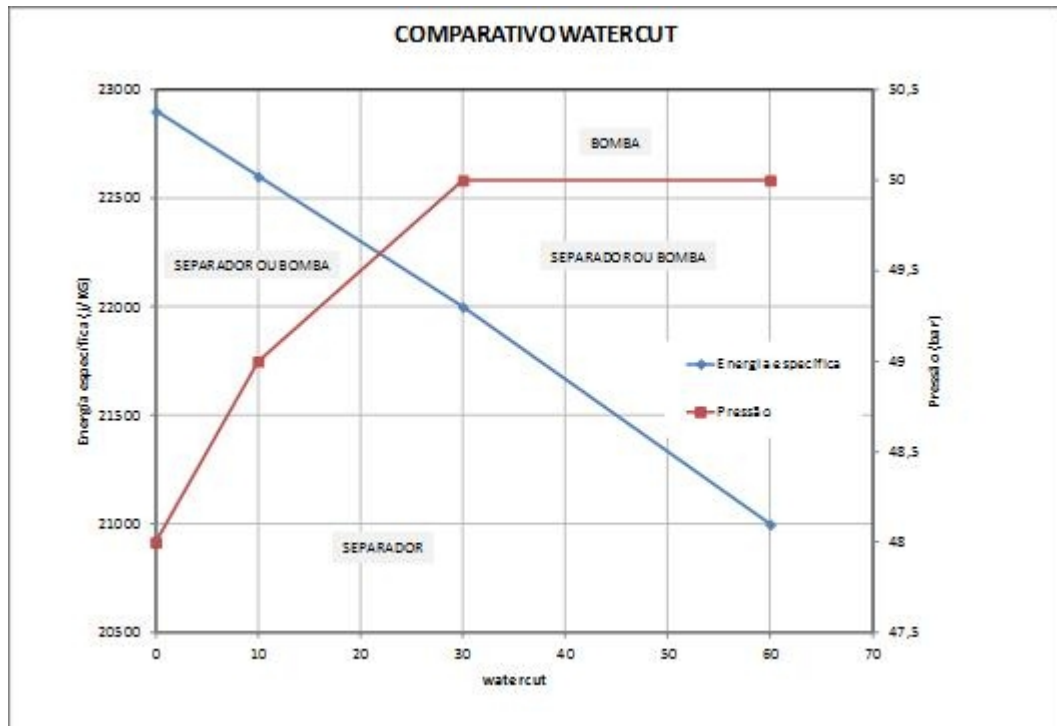


Figura 7-28: Gráfico comparativo da região de pressão e energia específica onde bomba multifásica e separador são mais eficientes observando a variação do *watercut*

Analisando o gráfico comparativo entre a bomba multifásica e o separador, percebe-se a região de transição onde um sistema torna-se preferencial. Porém como já comentado, deve-se ter cuidado ao analisar este gráfico, pois o aumento da eficiência está demonstrando somente um aumento de produção de água. O que não é desejável para nenhum dos sistemas submarinos. A solução nestes casos de altos percentuais de água seria a re-injeção submarina desta água que pode ser utilizada para manter a pressão do reservatório em níveis mais altos.

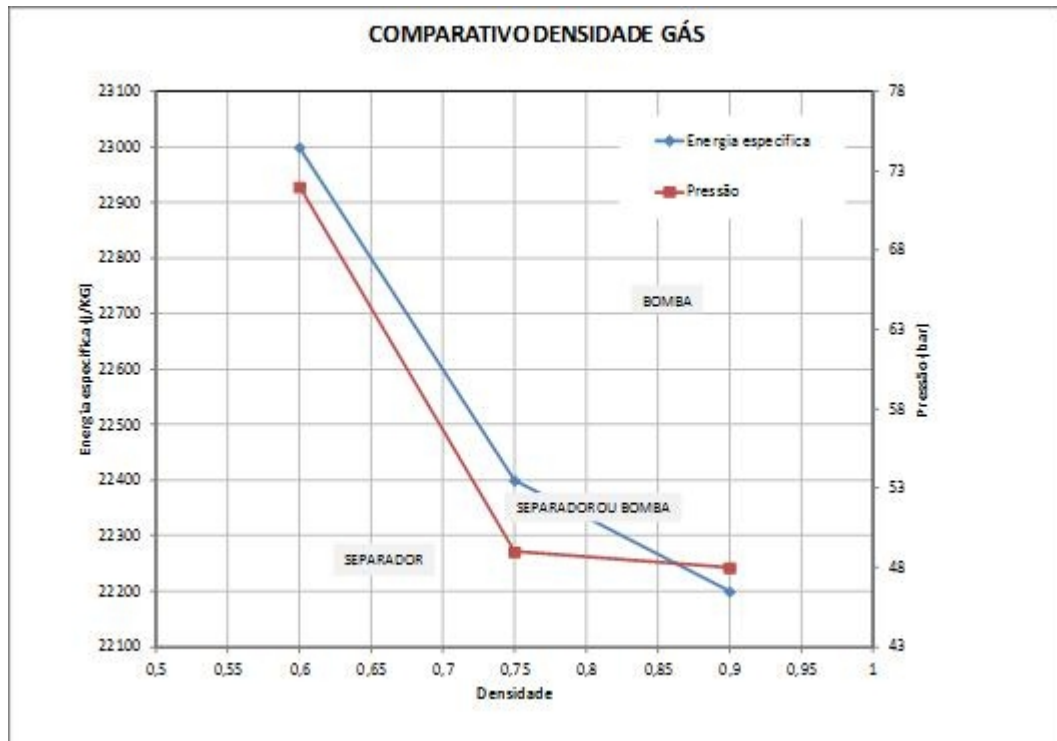


Figura 7-29: Gráfico comparativo da região de pressão e energia específica onde bomba multifásica e separador são mais eficientes observando a variação do densidade do gás

Observando o gráfico comparativo entre os sistemas submarinos com a variação da densidade de gás percebe-se pela região de transição a vantagem do separador submarino para gases mais leves e baixas pressões. Percebe-se que a região de transição é quase nula, definindo claramente regiões preferenciais para a bomba multifásica ou o separador, dependendo da pressão e energia considerada.