

João Raphael Souza Martins

Estudo do Problema do Fluxo de Golfadas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, departamento de Engenharia Elétrica.

Orientador:

Prof. Péricles Rezende Barros, PhD

Campina Grande

2011

Trabalho de Conclusão de Curso sob o título “ *Estudo do Problema do Fluxo de Gol-fadas* ”, defendida por João Raphael Souza Martins e aprovada 12 de dezembro de 2011, em Campina Grande, Paraíba, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Ph.D. Péricles Rezende Barros
Orientador

Prof. Convidado
UFCG

*Este trabalho é dedicado aos meus pais
cujo amor e sabedoria me inspiram
a melhorar dia após dia.*

Agradecimentos

Ao término deste trabalho, deixo aqui meus sinceros agradecimentos:

- a Deus por tudo;
- ao Prof. Ph.D. Péricles Rezende Barros, por toda dedicação, paciência e estímulo em sua orientação;
- a todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG;
- a minha família, pelo incentivo e segurança que me passaram durante toda a minha vida;
- a minha namorada, pelo amor e compreensão;
- aos amigos do curso de Engenharia Elétrica pelo agradável convívio;
- a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

“ *Toda regra tem a sua excessão.*”

Dito popular que se contradiz.

Resumo

Neste trabalho é realizada uma revisão bibliográfica de trabalhos que abordam um dos maiores problemas na extração de petróleo, o regime de fluxo com golfadas em sistemas encanamento-riser-separador. Além de descrever e analisar as diversas estratégias de controle utilizadas para minimizar suas causas e efeitos, de forma a aumentar a eficiência do processo. Foi realizada a estratégia de controle de pressão PID aplicada em um simulador do sistema encanamento-riser, com o objetivo de controlar a pressão no ponto baixo do encanamento e reduzir as variações dos fluxos exportados.

Sumário

Lista de Figuras

Introdução

1	O regime de fluxo de golfadas	p. 10
1.1	Classificação das golfadas	p. 11
1.2	Formação das golfadas	p. 12
2	Modelagem	p. 14
2.1	Descrição do Modelo	p. 14
2.2	Considerações	p. 15
2.3	Fundamentos	p. 16
3	Estratégias de Controle	p. 22
4	Análise e Resultados das Simulações	p. 34
5	Considerações Finais	p. 39
	Referências	p. 40

Lista de Figuras

2	Esquema simplificado de um sistema de extração de petróleo	p. 10
3	Tipos de golfadas	p. 11
4	Ciclo de formação do fluxo com golfadas no riser.	p. 13
5	Encanamento-riser	p. 15
6	Área de passagem do gás	p. 16
7	Ponto baixo bloqueado	p. 18
8	Ponto baixo não bloqueado	p. 19
9	Eliminação de golfadas proposto por Tengesdal	p. 24
10	Controle de nível com amortecimento de vazão	p. 25
11	Controle de golfadas de gás e líquido	p. 28
12	Esquema simplificado do processamento de óleo	p. 30
13	Simulador LSimGolf	p. 34
14	Simulador com os parâmetros utilizados na simulação	p. 35
15	Pressão na ponto baixo do encanamento (P1)	p. 35
16	Pressão no ponto alto do encanamento (P2)	p. 36
17	Fluxo mássico de Gás na Saída	p. 36
18	Fluxo mássico de líquido na saída	p. 36
19	Pressão no ponto baixo do encanamento (P1)	p. 37
20	Pressão no ponto alto do encanamento (P2)	p. 37
21	Fluxo mássico de gás na saída	p. 37
22	Fluxo mássico de líquido na saída	p. 37

Introdução

No Brasil, a maior parte da produção de petróleo está localizada em campos marítimos denominados *offshore*, o que dificulta a estruturação de toda a estação de tratamento em um pequeno espaço. Por este motivo, são aplicados métodos de tratamento com o objetivo de aumentar a eficiência dos equipamentos e processos.

No processo de prospecção de petróleo *offshore*, as plataformas petrolíferas são conectadas a diversos poços no fundo do oceano através de tubulações denominadas sistemas encanamento-*riser*. Essa tubulação percorre horizontalmente diversos quilômetros no fundo do oceano (encanamento) e ao chegar próximo a plataforma sobe vários metros (*riser*) até o nível desta, onde é coletado o fluxo multifásico, composto de água, óleo e gás, captado dos poços. Esta configuração, em conjunto com determinadas proporções da produção de fases líquida e gasosa favorecem o aparecimento de golfadas. Golfada esta, que por ser um regime de fluxo cíclico, alterna períodos com nenhuma produção de líquido, seguido de períodos de grande produção de líquido dentro do separador.

Nesse trabalho é estudado o regime de fluxo com golfadas que ocorre em um sistema encanamento-*riser*-separador e também formas de como evitar esse tipo de fluxo através da aplicação de estratégias de controle no sistema. A principal motivação para a instalação de um controle anti-golfadas é a possibilidade de aumentar e acelerar a produção e assim tornar o processo mais rentável economicamente.

1 *O regime de fluxo de golfadas*

O regime do fluxo multifásico é frequente na natureza e em muitos processos industriais. A distribuição das fases depende das condições operacionais do sistema. No âmbito da extração de petróleo, o fluxo multifásico percorre as tubulações que conectam as plataformas de produção na superfície do oceano aos poços no fundo do mar. Essa mistura é normalmente composta por água, óleo e gás.

O regime de fluxo múltifásico característico na indústria de produção de petróleo é o de golfadas. Com a expansão da atividade de produção de petróleo em profundidades cada vez maiores, são utilizadas tubulações cada vez mais longas, com configurações que apresentam um trecho horizontal, eventualmente com algum ponto baixo e um trecho vertical até a plataforma, como podemos ver na figura 1.

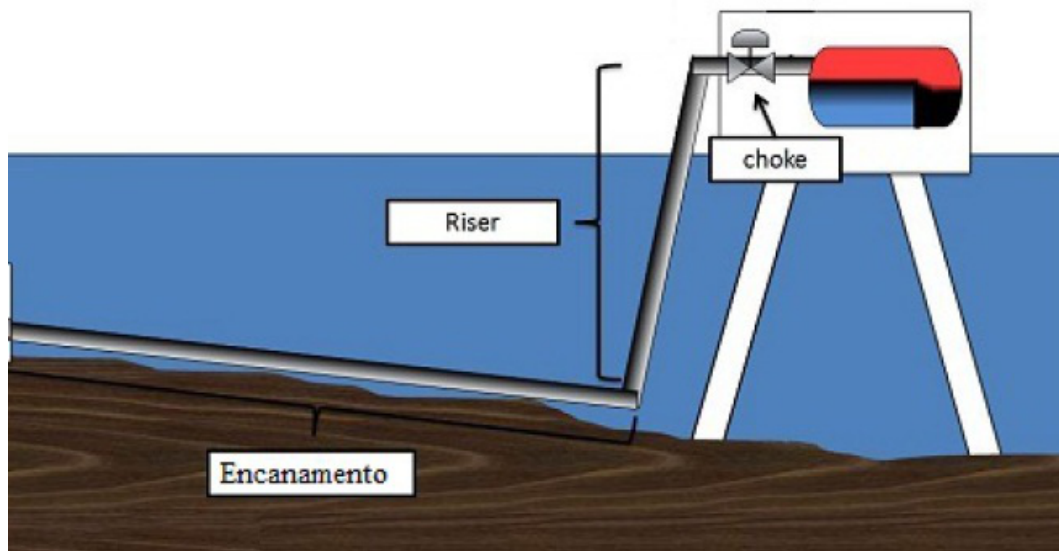


Figura 1: Esquema simplificado de um sistema de extração de petróleo. Fonte: (ANDRADE, 2011)

Esta configuração, em conjunto com determinadas proporções da produção de fases líquida e gasosa favorecem o aparecimento de golfadas. Elas podem ocorrer de diferentes formas, ritmos e escalas, dependendo do mecanismo base para sua formação. Sua característica principal é o fluxo severo e irregular com oscilações de pressão e vazão.

1.1 Classificação das golfadas

Segundo (STORKAAS, 2005), dependendo da parte da tubulação onde a golfada ocorra, a mesma pode ser classificada como:

- **Hidrodinâmica:** ocorre na seção horizontal do encanamento, desenvolvendo-se quando ondas de líquido fecham a seção transversal da tubulação (ver Figura 2a).
- **Em terrenos:** desenvolve-se onde o encanamento cruza o fundo oceânico em terrenos com altos e baixos topográficos (ver Figura 2b).
- **No riser (tubulação ascendente):** ocorre quando o riser está cheio de líquido e a pressão do gás no encanamento torna-se maior que o peso da coluna de líquido e então esse volume é lançado para fora da tubulação (ver Figura 2c).
- **Transiente:** causada pelo aumento das taxas de fluxo dos fluidos na saída da tubulação para os instrumentos à jusante, e ocorrem em resposta às mudanças nas condições operacionais do sistema, como por exemplo, na abertura da válvula Z no topo da tubulação.

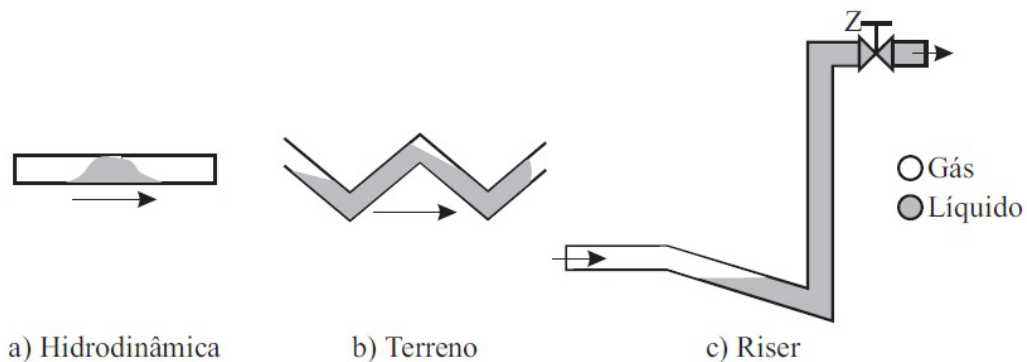


Figura 2: Tipos de golfadas. Fonte: (LIRA, 2011)

1.2 Formação das golfadas

O padrão de golfadas pode ser gerado a partir de um padrão estratificado basicamente por dois mecanismos: o natural crescimento das instabilidades hidrodinâmicas e a acumulação do líquido causada pela ondulação da tubulação. No primeiro caso, pequenas perturbações na forma de pequenas ondas surgem naturalmente, podendo crescer em ondas de maior tamanho na superfície do líquido. Tais ondas podem continuar crescendo capturando líquido que escoava na frente das mesmas, até saturar a secção transversal do líquido, de modo a formar golfadas (*Ansari*). Em tubulações inclinadas as golfadas podem se formar devido ao retardo e a acumulação de líquido nos declives, levando a completação da secção transversal com líquido ((SCHMIDT; BRILL; BEGGS, 1979), (JANSEN, 1990)).

O comportamento cíclico da golfada é dividido em quatro fases, como é mostrado na figura 3:

1. Geração da Golfada: o regime de fluxo inicia-se com baixa pressão e velocidade dos fluidos na seção de alimentação do encanamento, então em um determinado momento o líquido bloqueia o fluxo de gás no ponto-baixo iniciando a formação de uma golfada de líquido contínua no riser.
2. Produção da Golfada: enquanto a quantidade de líquido no riser aumenta mais rapidamente que a variação da pressão entre o topo e a seção de alimentação, a golfada continua crescendo.
3. Explosão: ocorre quando a pressão do gás na seção de alimentação torna-se maior que o peso da coluna de líquido no riser, conseqüentemente essa quantidade de líquido é enviada para fora do sistema.
4. Retorno: após uma grande quantidade de líquido e de gás deixarem o sistema, a pressão na seção de alimentação diminui, então o líquido começa a acumular no ponto-baixo reiniciando o ciclo.

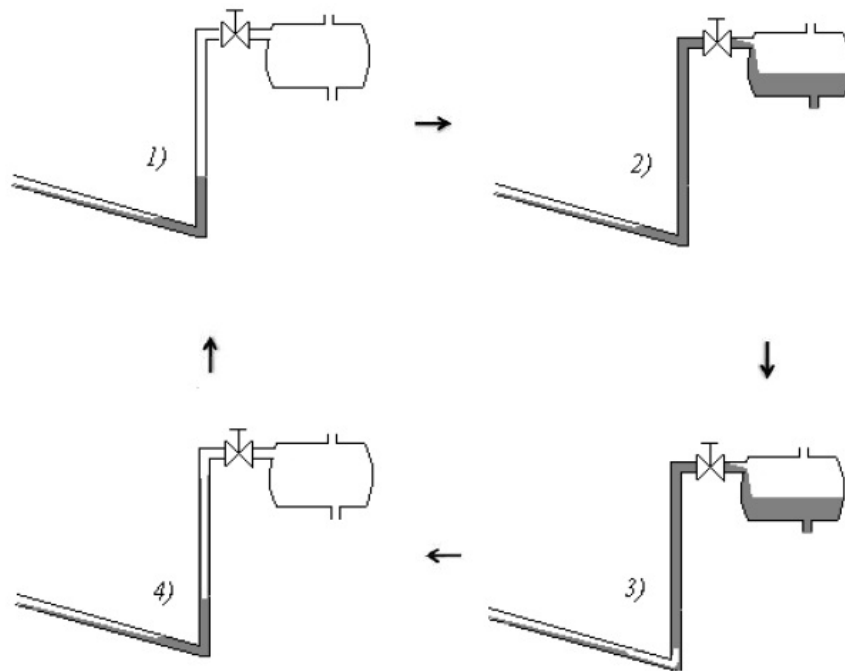


Figura 3: Ciclo de formação do fluxo com golfinhos no riser.

As golfinhos provocam instabilidade no controle da planta de produção de óleo e de gás com possíveis riscos de parada de produção. Esta instabilidade ocorre devido as variações de pressões e vazões dos fluidos na tubulação, o desempenho do processo pode ser comprometido. Por ser um regime de fluxo cíclico, alterna períodos com nenhuma produção de líquido, seguido de períodos de grande produção de líquido dentro do separador, uma vez que há a geração de grandes zonas de pressão. Com isso, temos uma variação brusca de vazão dos poços, que afeta a eficiência da separação entre a água, óleo e gás, e que pode gerar uma queima indesejável de gás ou a uma parada de emergência da plataforma por nível muito alto nos separados. Em casos de golfinhos muito severos pode causar até inundação. As golfinhos também causam vibrações na tubulação, ocasiona desgaste e danos nos equipamentos do processo.

2 Modelagem

(STORKAAS, 2005) desenvolveu um modelo matemático denominado modelo dinâmico simplificado com três variáveis de estado onde os princípios básicos de modelagem são mudados, pois é descrito o comportamento macro do sistema em vez dos detalhes físicos que governam o fluxo. É considerado que o fenômeno de golfadas é dirigido por pressão e gravidade, de forma a abranger ambos.

Esse modelo prediz as propriedades do sistema que são relevantes para os propósitos de controle e são similares as encontradas no modelo mais complicado composto pelo conjunto de equações diferenciais parciais(EDP). Por essas razões, o modelo dinâmico simplificado proposto por (STORKAAS, 2005) é escolhido nesse trabalho para representar o regime de fluxo com golfadas em um sistema encanamento-*riser*.

2.1 Descrição do Modelo

Segundo (STORKAAS, 2005), o modelo dinâmico simplificado descreve as seguintes características de uma tubulação em condições de golfadas:

- A presença de uma solução estacionária instável que ocorre nas mesmas condições do regime de fluxo com golfadas.
- A natureza da transição do regime estável para o regime de fluxo com golfadas (comportamento dinâmico).
- A estabilidade do regime de fluxo como função da abertura da válvula no topo do *riser*.
- A amplitude e frequência das oscilações do regime de fluxo com golfadas.

2.2 Considerações

O modelo estudado considera um tubo com um trecho horizontal, levemente inclinado, seguido de um *riser* composto por um trecho vertical e um trecho horizontal até a válvula de saída como mostrado na Figura 4.

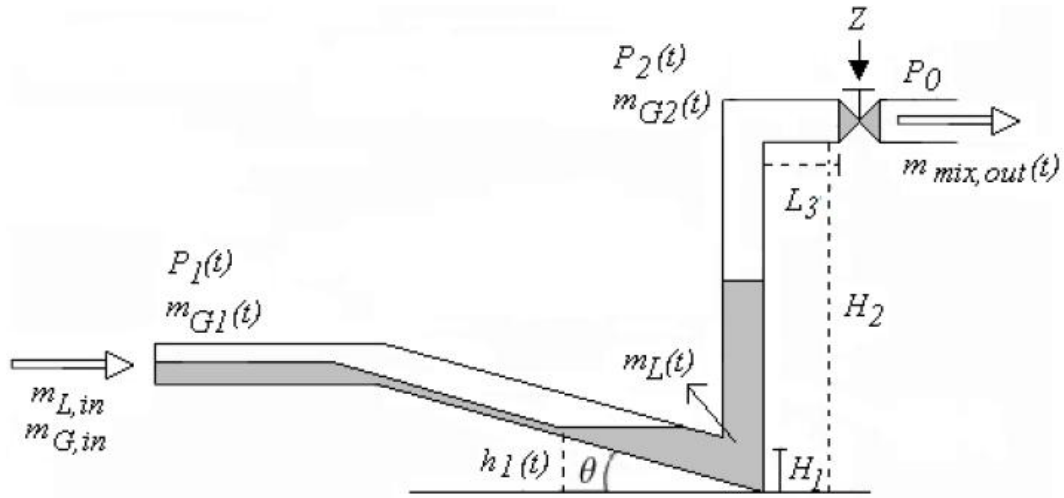


Figura 4: Encanamento-riser Fonte:(STORKAAS, 2005)

Onde θ é a inclinação da tubulação, h_1 é a altura do líquido na seção 1, H_2 é a altura do *riser*, L_i é o comprimento da seção i , d_i é o diâmetro na seção i , A_1 é a área horizontal formada pelo nível de líquido na seção de alimentação.

$$A_1 = \frac{A_2}{\sin \theta} \quad (2.1)$$

A_2 é a área transversal do encanamento, A_3 área da seção transversal (plano horizontal) topo até a válvula. V_T é o volume total no *riser*, H_1 é a altura do cotovelo, ponto baixo na geometria da tubulação que favorece o acúmulo de líquido, bloqueando a passagem de gás.

As considerações feitas para a modelagem são:

- C1: Velocidade do líquido e volume do gás constantes na seção de alimentação do encanamento.
- C2: Somente um estado dinâmico de líquido $m_L(t)$, que inclui o declive do encanamento e parte do líquido no riser (ponto-baixo do sistema encanamento-riser)
- C3: Dois estados dinâmicos de gás $m_{G1}(t)$ e $m_{G2}(t)$, ocupando os volumes respectivamente, separados pelo ponto-baixo e conectados por uma relação de fluxo e pressão.

- C4: Modelo da válvula simplificado para a mistura de líquido e de gás que deixa o sistema no topo do riser.
- C5: Balanço de pressão estacionária entre a seção de alimentação do encanamento e o topo do riser (entre as pressões $P_1(t)$ e $P_2(t)$).
- C6: Comportamento de gás ideal.
- C7: Temperatura do sistema constante.

2.3 Fundamentos

Quando o fluxo de gás e líquido inicia sua penetração na tubulação de alimentação, ocorre um acúmulo de líquido no ponto baixo do mesmo e a passagem de gás pelo "cotovelo" da tubulação (\hat{A}) será dependente deste nível de líquido acumulado, podendo ser definido pelo segmento circular, como ilustrado pela figura 5 (RODRIGUES, 2009):

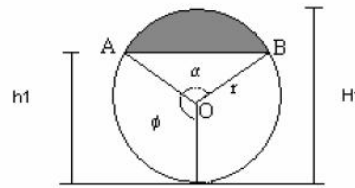


Figura 5: Área de passagem do gás. Fonte: (RODRIGUES, 2009)

e pode ser expressa por:

$$\hat{A} = A_{circulo} - A_{áreadolíquido} = \frac{\alpha r^2}{2} - r^2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.2)$$

onde temos que:

$$\frac{\alpha}{2} = \pi - \phi. \quad (2.3)$$

Assim, a área de passagem de gás no ponto baixo da tubulação é dada por:

$$\hat{A} = r^2(\pi - \phi - \cos(\pi - \phi) \sin(\pi - \phi)). \quad (2.4)$$

sendo que ϕ é dado por:

$$\phi = (\pi - \arccos(1 - \frac{(H_1 - h_1) \cos(\theta)}{r})). \quad (2.5)$$

Com o decorrer do tempo, a parte baixa do encanamento é bloqueada pelo líquido, impedindo a passagem de gás, e quando este acúmulo de líquido ocorre, acarreta em um aumento de pressão na seção 1, até que seja suficiente para empurrar a barreira líquida e assim abrir a passagem de gás.

As pressões nas seções 1 e 2 são obtidas pelas equações obtida através da equação de estado dos gases ideais, respectivamente:

$$P_1(t) = \frac{m_{G_1}(t)RT}{V_{G_1}M_G}. \quad (2.6)$$

$$P_2(t) = \frac{m_{G_2}(t)RT}{V_{G_2}M_G}. \quad (2.7)$$

Onde temos que m_{G_i} é a massa de gás na seção i , kg ; V_{G_i} é o volume de gás na seção i , m^3 ; R é a constantes dos gases ideais, $J/KKmol$; M_G é o peso molecular do gás, $kg/kmol$; T é a temperatura do sistema, K .

O balanço de pressão estacionário no sistema encanamento-*riser* é dado pela variação de pressão entre a seção de alimentação do encanamento (pressão $P_1(t)$), e o topo do riser (pressão $P_2(t)$). Esse balanço é igual a diferença entre, as pressões hidrostáticas dos fluidos no riser e no declive do encanamento, sua equação é dada por (STORKAAS, 2005) como sendo:

$$P_1(t) - P_2(t) = \bar{\rho}(t)g(H_2 + H_3) - \rho_Lgh_1 \quad (2.8)$$

Onde temos que $P_1(t)$ é a pressão do gás no volume 1, N/m^2 ; $P_2(t)$ é a pressão do gás no volume 2, N/m^2 ; g é a gravidade $9,8ms^2$; $\bar{\rho}(t)$ é a densidade média da mistura no *riser*, kg/m^3 ; H_2 é a altura do riser, m ; H_3 é o diâmetro do riser, m ; ρ_L é a densidade do líquido considerada constante, kg/m^3 ; $h_1(t)$ é o nível de líquido no declive, m .

No topo do riser há uma válvula, denominada válvula Z . A vazão da mistura (gás-líquido) que sai do sistema é determinada através de uma equação simplificada para essa válvula, dada por

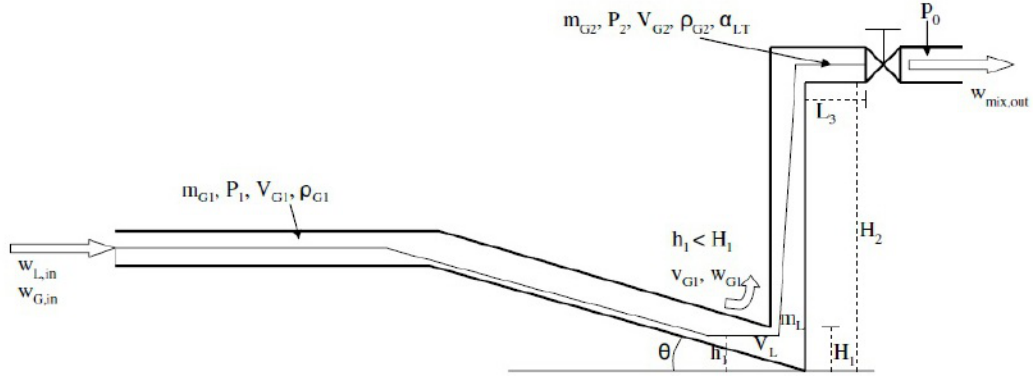


Figura 7: Ponto baixo não bloqueado. Fonte: (STORKAAS, 2005)

É assumido que a variação de pressão dirigirá o gás através de uma válvula de abertura igual a $(H_1 - h_1(t))/H_1$. Baseado em experimentos e erro, (STORKAAS, 2005) sugeriu a seguinte equação da válvula para o ponto baixo:

$$m_{G_1}(t) = K_2 \hat{A}(t) \frac{(H_1 - h_1(t))}{H_1} \sqrt{\rho_{G_1}(t) [P_1(t) - P_2(t) - g \rho_L \alpha_L(t) H_2]} \quad (2.10)$$

onde: K_2 é um parâmetro de ajuste do modelo; $\hat{A}(t)$ é a área da seção transversal por onde passa o gás no ponto-baixo, m^2 ; $\rho_{G_1}(t)$ é a densidade de gás no volume 1, kg/m^3 ; Tem-se que a vazão de gás do volume V_{G_1} para o volume $V_{G_2}(t)$ é dada por:

$$m_{G_1}(t) = v_{G_1}(t) \rho_{G_1}(t) \hat{A}(t) \quad (2.11)$$

onde: $v_{G_1}(t)$ é a velocidade de gás no ponto-baixo, m/s . Então igualando-se as duas equações e isolando-se $v_{G_1}(t)$ teremos que para $h_1(t) < H_1$

$$v_{G_1}(t) = K_2 (H_1 - h_1(t)) / H_1 \sqrt{\frac{P_1(t) - P_2(t) - g \rho_L \alpha_L(t) H_2}{\rho_{G_1}(t)}}. \quad (2.12)$$

E para $h_1(t) > H_1$

$$v_{G_1}(t) = 0. \quad (2.13)$$

Segundo (SCHMIDT; BRILL; BEGGS, 1979) a distribuição de líquido no sistema encanamento-*riser* ocorre através de uma equação de carregamento, ou seja considera-se que o gás carrega o líquido pelo *riser*. Nesse caso, modela-se diretamente a fração de volume de

líquido $\alpha_{LT}(t)$ que está saindo do *riser* através da válvula Z . Pois sabe-se que $\alpha_{LT}(t)$ reside entre dois extremos:

O líquido comporta-se como se estivesse em um tanque, no ponto-baixo, bloqueando totalmente o fluxo de gás, por essa razão não existe gás fluindo através do *riser* ($v_{G1}(t) = 0$), logo:

$$\alpha_{LT}(t) = \alpha_{LT}^*(t). \quad (2.14)$$

Onde temos que $\alpha_{LT}^*(t)$ é a fração de líquido que está saindo do *riser* através da válvula Z quando não tem fluxo de gás no ponto-baixo. Nessa situação $\alpha_{LT}^*(t) = 0$.

Como não há deslizamento entre as fases. Neste caso:

$$\alpha_{LT}(t) = \alpha_L(t). \quad (2.15)$$

Portanto, a transição entre os dois extremos citados acima ocorre da seguinte maneira: no instante em que o líquido bloqueia o *riser* a fração de líquido no topo é $\alpha_{LT}^*(t) = 0$, como passar o tempo a quantidade de líquido no *riser* vai aumentando até que $\alpha_{LT}^*(t) > 0$, e conseqüentemente $\alpha_{LT}^*(t) = \alpha_L(t) = \alpha_{LT}(t)$. É assumido que essa transição depende de um parâmetro $q(t)$ e a equação de carregamento de líquido pelo *riser* é dada por:

$$\alpha_{LT}(t) = \alpha_{LT}^*(t) + \frac{q_n(t)}{1 + q_n(t)}(\alpha_L(t) - \alpha_{LT}^*(t)) \quad (2.16)$$

Sendo que:

$$q(t) = \frac{K_3 \rho_{G1}(t) v_{G1}^2(t)}{\rho_L - \rho_{G1}} \quad (2.17)$$

onde: K_3 é um parâmetro de ajuste do modelo; ρ_L é a densidade do líquido, kg/m^3 ; ρ_{G1} é a densidade de líquido no volume 1, kg/m^3 e n é um parâmetro de ajuste para a equação de carregamento.

O termo ρ_T é a massa específica na parte superior do *riser*, que é dado por

$$\rho_T = \alpha_{LT} \rho_L + (1 - \alpha_{LT}) \rho_{G2}(t). \quad (2.18)$$

A vazão líquida na saída é da por:

$$m_{L,out} = \alpha_L^m(t)m_{mix,out}(t). \quad (2.19)$$

e a vazão de gás

$$m_{G,out} = (1 - \alpha_L^m(t))m_{mix,out}(t). \quad (2.20)$$

O modelo dinâmico simplificado possui três variáveis de estado: o líquido preso no ponto baixo do encanamento-*riser*, $m_L(t)$; o gás preso na seção de alimentação do encanamento, $m_{G_1}(t)$; e o gás preso no *riser*, $m_{G_2}(t)$. As equações de conservação de massa do modelo são:

$$\frac{dm_L(t)}{dt} = m_{L,in} - m_{L,out} \quad (2.21)$$

$$\frac{dm_{G_1}(t)}{dt} = m_{G,in} - m_{G_1} \quad (2.22)$$

$$\frac{dm_{G_2}(t)}{dt} = m_{G_1} - m_{G,out} \quad (2.23)$$

Onde temos que $m_L(t)$ é a massa de líquido, kg ; $m_{G_i}(t)$ é a massa de gás no volume i , kg ; $m_{L,in}$ é a vazão de líquido que entra no sistema, kg/s ; $m_{L,out}(t)$ é a vazão de líquido que sai do sistema, kg/s ; $m_{G,in}$ é a vazão de gás que entra no sistema, kg/s ; $m_{G,out}(t)$ é a vazão de gás que sai do sistema, kg/s ; $m_{G_1}(t)$ é a vazão de gás interna, kg/s . Os detalhes da modelagem para a obtenção das equações podem ser encontrados no trabalho de (STORKAAS, 2005).

3 Estratégias de Controle

Neste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica com o intuito de descrever e analisar diferentes técnicas de controle para o problema do fluxo de golfadas. A abordagem intuitiva para o problema do fluxo de golfadas é detectar a golfada e tentar limitar o seu tamanho, a fim de restringir o efeito que tem sobre os separadores e compressores nas instalações de produção. Tendo em vista que um dos principais objetivos de um sistema de controle é dar uma maior estabilidade operacional para o processo.

(YOCUM, 1973) identificou diferentes técnicas de eliminação de golfadas que ainda são considerados atualmente, tais como:

- Redução do diâmetro da linha de fluxo: consiste na aplicação de um dispositivo no encanamento de modo que o seu diâmetro seja reduzido, conseqüentemente aumentando a pressão na tubulação, evitando a acumulação de líquido no ponto-baixo.
- Divisão do fluxo multifásico: consiste no uso de instrumentos extra na tubulação tais como separadores de menor dimensão, coletores de golfadas, e riser adicional, de modo que os fluidos sejam separados e enviados em linhas de fluxo distintas para a plataforma principal.
- Injeção de gás: consiste em usar compressores e encanamento extra para injetar gás no ponto-baixo do riser com o objetivo de aumentar sua velocidade e empurrar o líquido tubulação acima.
- Fechamento da válvula no topo do encanamento: consiste em diminuir a abertura da válvula no topo do riser para aumentar a pressão na linha de fluxo e portanto a velocidade dos fluidos na tubulação.

(YOCUM, 1973) considerou a utilização da injeção de gás no sistema como solução para controlar o fluxo de golfadas, mas considerou que devido aos custos com compressores e com a tubulação necessária para transportar o gás e injetá-lo no sistema, esta não é uma

técnica economicamente viável. (POTS; BROMILOW; KONIJN, 1985), estudaram os efeitos do método de injeção de gás. Como resultado, observaram que o ciclo da golfada não é tão severo quando a quantidade de gás injetada no riser é igual a 50% do valor da vazão de gás que entra no sistema. Constataram também que a golfada não foi eliminada quando a quantidade de gás injetada é igual a 300% desse valor. Com isso, Pots et al. constatou que com a injeção de gás, houveram reduções na pressão e na quantidade de líquido. Porém, foi observado um grande volume de gás necessário para a obtenção de um fluxo estável no riser, de forma a requerer altos custos.

Em (TAITEL; JANSEN; SHOHAN, 1996) é realizado um controle por meio da manipulação da válvula no topo da tubulação ascendente. Onde a válvula é fechada na ocorrência da golfada de forma a obstruir a passagem de líquido e assim, reduzir o fluxo da golfada. Com a menor abertura, uma maior quantidade de líquido se desloca ao ponto baixo da tubulação, aumentando assim a pressão. Com isso, a quantidade de gás no topo da tubulação ascendente é menor, ocasionando uma diminuição da pressão, como consequência há um aumento da pressão do sistema e da velocidade dos fluidos na tubulação, o que evita o acúmulo de líquido no ponto baixo da tubulação. Dessa forma, é evitado o fluxo de golfadas. Porém, o ato de fechar significativamente a válvula reduz a vazão de saída e assim causa severas reduções na capacidade da produção (YOCUM, 1973).

Em (TENGESEDAL, 2002.) é estudada uma estratégia a ser utilizada em golfadas mais severas que consiste em acrescentar um encanamento com diâmetro menor para transferir gás da tubulação horizontal para a tubulação ascendente. Esse processo de transferência de gás reduz a quantidade de líquido acumulado na tubulação ascendente e a pressão na seção de alimentação do encanamento, como pode ser observado na Figura 8.

A partir de agora serão mostradas estratégias de controle com realimentação em um sistema tubulação-separador sujeito a um regime de fluxo com golfadas. Este tipo de estratégia mostrou-se bastante eficiente, utilizando um número menor de equipamentos adicionais, tendo assim um menor custo de implantação e manutenção, além de propiciar um aumento da produção de petróleo, como foi visto em (POTS; BROMILOW; KONIJN, 1985).

Segundo (CAMPOS; LAUREIRO; FILHO, 2006) , estratégias de controle baseadas em realimentação são vistas atualmente como uma solução promissora para o controle anti-golfadas. O seu uso têm muitas vantagens, pois ao estabilizar um ponto de operação instável no riser resultará em: menos equipamentos na superfície da plataforma, aumento na produção, aumento na recuperação de óleo e menor desgaste e rompimento dos equipa-

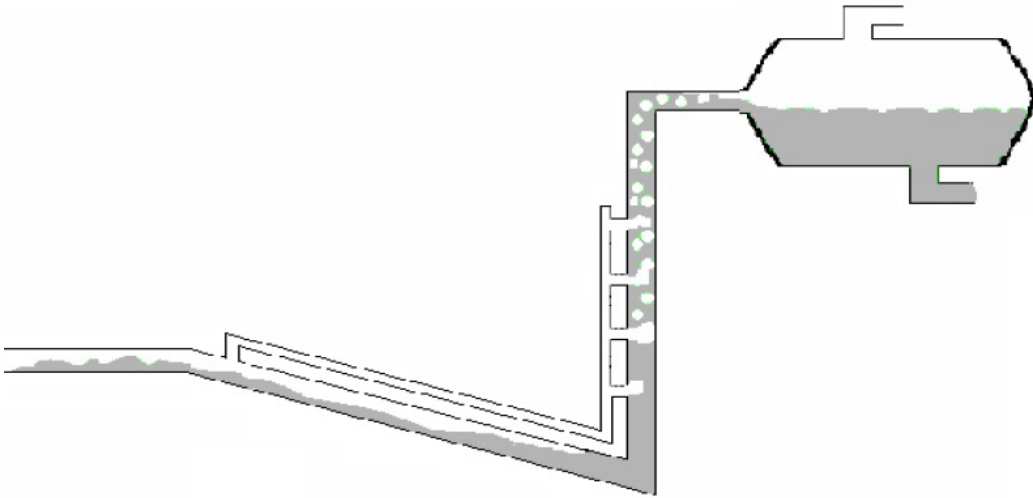


Figura 8: Eliminação de golfadas proposto por (TENGEDAL, 2002.)

mentos do processo, (STORKAAS, 2005).

(FILHO; MEIRA; VAZ, 2005) apresentam uma estratégia de controle de nível para separadores óleo/gás com o objetivo de estabilizar plantas de processamento primário de petróleo. O objetivo dos controladores de nível da plataforma é evitar que o nível saia de uma faixa normal de operação, entretanto, não é necessário manter o nível rigorosamente no setpoint, (CAMPOS; LAUREIRO; FILHO, 2006). Segundo (FILHO; MEIRA; VAZ, 2005), variações abruptas de vazão na entrada do separador são comuns devido as características do escoamento dos poços até a planta. Para controlar o nível do separador tradicionalmente é utilizado um controlador PID atuando numa válvula instalada na saída de óleo do vaso. Com o controlador de nível sintonizado para manter o nível constante, as oscilações de vazão na entrada do vaso se propagam para a saída, causando instabilidade nos equipamentos instalados à jusante do separador. Utilizando uma sintonia menos agressiva, variações de vazão na entrada do separador podem provocar nível alto e arraste de óleo pelo gás causando danos aos moto compressores de recuperação de vapor ou nível baixo, acarretando baixa vazão e pressão no oleoduto. O controlador de nível ideal deve permitir que o nível varie dentro de uma faixa operacional para que as vazões na saída de óleo sejam menos oscilatórias. Esta especificação de resposta não pode ser plenamente atendida por um controlador PID com realimentação simples.

(FILHO; MEIRA; VAZ, 2005) utilizam duas variáveis de processo (grandeza ou condição que é medida e controlada) e apenas uma variável manipulada (grandeza ou condição modificada pelo controlador) para controlar o nível com amortecimento de vazão. Para

atender este objetivo é utilizada a medição da vazão de saída e um novo algoritmo de controle, conforme ilustrado na figura 9. O algoritmo utilizará dois controladores PID, sendo um de nível e outro de vazão conforme será detalhado a seguir. O controlador atua na válvula de controle de nível do separador (LV) e utiliza os sinais de nível do transmissor LT e vazão de saída de óleo do FT. O algoritmo de controle é constituído por um controlador cascata com ação antecipativa (LIC+FIC+lag), um controlador com realimentação simples (LIC), uma inferência de vazão de entrada de líquidos (IVEL/FT2), uma lógica de seleção do controlador (LSC) e do set-point e parâmetros do LIC (SSPL), como ilustrado na figura 9.

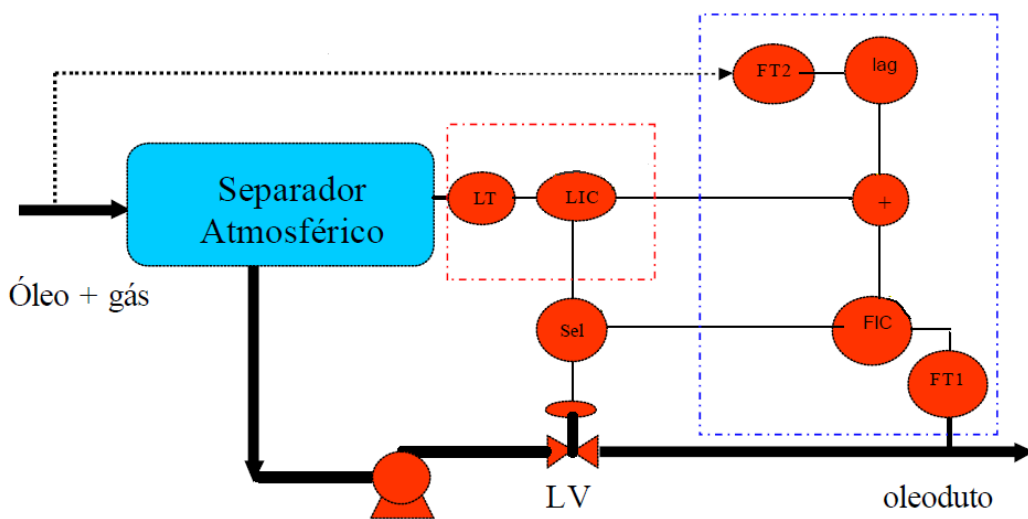


Figura 9: Controle de nível com amortecimento de vazão. Fonte: (FILHO; MEIRA; VAZ, 2005)

O sistema descrito por (FILHO; MEIRA; VAZ, 2005) utiliza duas estratégias de controle, realimentação simples no retângulo vermelho e a estratégia cascata com realimentação no retângulo azul da figura acima, selecionadas conforme condição operacional do nível, através do bloco "Sel". O controle em cascata com ação antecipativa é usado quando o nível está dentro da faixa normal de operação e visa permitir variação de nível em torno de uma referência (set-point do controlador mestre), amortecendo oscilações de vazão que sejam menores ou iguais à capacidade do separador, porém respondendo às variações de carga. A estratégia consiste de um controlador mestre de nível (LIC) com sintonia lenta, comandando um controlador escravo de vazão (FIC). A ação antecipativa proveniente do sinal inferido e filtrado da vazão de entrada do separador (FT2 - transmissor virtual) é somada à saída do controlador mestre. Enquanto o controle por realimentação simples (controle convencional) é utilizado quando o nível está fora da faixa normal de operação

Tabela 1: Tabela dos pontos de operação

Pontos de Operação	Controlador Utilizado
Normal	Cascata com ação antecipativa (LIC+FIC)
Crítica	Realimentação simples (LIC) com ganhos e set-points elevados
Transitória	Realimentação simples (LIC) com ganhos e set-point mais suaves

devido a variações de vazões maiores que a capacidade de acumulação do separador. Esta estratégia tem como objetivo retornar o nível para uma faixa segura, sem causar variações bruscas na vazão de saída do separador. A estratégia consiste de um controlador de nível (LIC) por realimentação. Neste modo de operação o controlador LIC possui set-point e ganhos dinâmicos e rampas para transição.

Porém (FILHO; MEIRA; VAZ, 2005) constataram que para que a cascata com ação antecipativa funcione, é necessário que o separador possua um volume acima e abaixo do set-point de nível para ser utilizado como acumulador das oscilações de vazão de entrada. Se este volume for inferior ao volume da oscilação o algoritmo de controle comuta de controle cascata com ação antecipativa para controle por realimentação simples. Comutação esta que como descrito anteriormente, é controlada pelo bloco lógico discreto Sel e deve ser feita de forma suave com o nível retornando para o set-point normal. Para isso são usados três valores de set-point e de ganhos de controlador de nível, selecionados conforme lógica discreta, tendo como sinais de entrada um conjunto de valores de referência de nível.

Foi designado que o sistema pode estar em nos pontos de operação normal, crítica ou transitória. A operação normal utiliza a estratégia cascata com ação antecipativa (LIC+FIC). Se o sistema atinge um nível atinge de valores fora da faixa de operação, o sistema entra na situação crítica e a lógica altera o controlador para realimentação simples (LIC) com ganhos e set-points elevados que visam sair da situação crítica. Após retornar a faixa de nível normal, a lógica de chaveamento considera que o sistema está na situação transitória e passa a utilizar ganhos e set-points mais suaves para possibilitar um retorno automático para a situação normal com a estratégia cascata com ação antecipativa. Os pontos de operação, como também o controlador utilizado em cada ponto está explicitado na tabela 1.

Essa estratégia de controle trouxe os seguinte benefícios: melhor eficiência das bombas de transferência, tendo como consequência aumento de produção de óleo; menor oscilação de vazão de nível no separador da plataforma de tratamento de óleo, por conseguinte melhor qualidade da separação água/óleo; menor desgaste das bombas, válvulas e transmissores de vazão; melhor precisão fiscal de vazão de exportação; melhor precisão no

sistema de detecção de vazamento. O algoritmo proposto atendeu as especificações de desempenho, a planta passou a trabalhar de maneira mais estável, essa solução foi de baixo custo, uma vez que não foi necessário a montagem de equipamentos adicionais (FILHO; MEIRA; VAZ, 2005) .

Em (FILHO; MEIRA; VAZ, 2004) é apresentado um Sistema de Controle de Golfadas projetado para atenuar variações bruscas de vazão de gás e líquido. O sistema consiste de uma válvula de controle instalada na entrada do separador, transmissores, controlador, algoritmo de controle e uma estação de monitoração. Este sistema está operando numa plataforma de produção offshore da Petrobrás, na bacia de Campos, tendo reduzido a queima de gás em 45% sem perda de produção de óleo.

O Sistema de Controle de Golfadas utilizado por (FILHO; MEIRA; VAZ, 2004) consiste de uma válvula de controle, transmissores, controlador lógico programável (CLP), algoritmo de controle e uma estação de monitoração. A figura 10 mostra a instrumentação utilizada e a interligação ao controlador. A estratégia de controle visa fechar a válvula de entrada do separador (FV) só nos momentos de ocorrência de golfadas, ficando aberta o máximo de tempo possível, para não ocorrer perda de produção de óleo. A estratégia de controle implementada no CLP, é dividida em duas partes: controle de golfada de gás e controle de golfada de líquido. O controle de golfada de gás atua na válvula localizada na entrada do separador (FV). O controle de golfada de líquido atua na FV e na válvula de saída de gás do separador (PV). O controle da golfada de gás objetiva reduzir o aumento da vazão e da pressão de gás enquanto que o controle da golfada de líquido objetiva evitar nível alto de óleo no separador.

O algoritmo de controle de golfada de gás é composto por quatro controladores PID: o controlador de vazão (FIC), pressão (PIC), variação de vazão (DFIC) e variação de pressão (DPIC), cujas saídas vão para um seletor de maior sinal. Onde o controlador de vazão FIC tem como variável controlada a vazão de gás na saída do separador FT1. O controlador de pressão PIC tem como variável controlada a pressão a jusante da FV, medida pelo transmissor PT2. O maior sinal de saída dos controladores vai para um limitador de sinal máximo e mínimo para evitar fechamento ou abertura total da válvula FV. Cada controlador possui um seletor de inibição de saída de forma que se possa sintonizar e avaliar o desempenho de cada um deles separadamente. Na saída do limitador de sinal existe um seletor automático/manual para possibilitar a desabilitação total do sistema. O controlador de vazão FIC tem como variável controlada a vazão de gás na saída do separador FT1. O controlador de pressão PIC tem como variável controlada a pressão

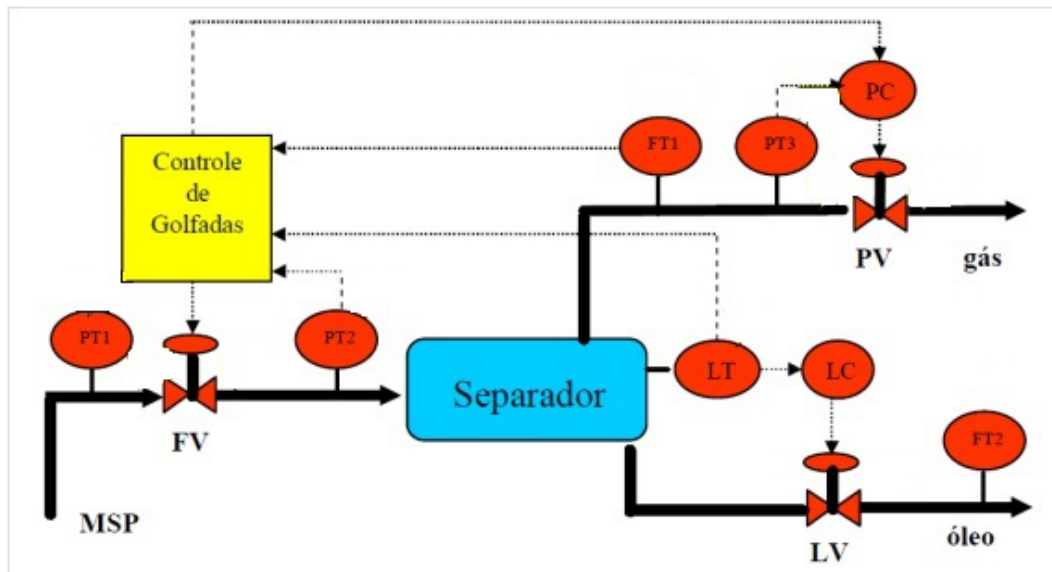


Figura 10: Controle de golfo de gás e líquido. Fonte: (FILHO; MEIRA; VAZ, 2004)

à jusante da FV, medida pelo transmissor PT2. Estes controladores tem como função limitar a vazão e pressão máximas no separador. Os controladores de variação de vazão DFIC e de variação de pressão DPIC são os controladores principais e tem como variável controlada a derivada dos sinais dos transmissores FT1 e PT2, respectivamente. Eles controlam variações bruscas de vazão de gás na saída do separador e de pressão na entrada do separador, respectivamente. A referência dos controladores DFIC e DPIC variam de acordo com um algoritmo que considera variações na produção de óleo e utiliza o cálculo de volume de óleo produzido em um certo período de tempo. O objetivo é suprimir golfo sem perda de produção.

O Algoritmo de Controle de Golfo de Líquido é dividido em duas partes: um seletor de "set-point" para o controlador de pressão do separador existente (PC) e um controlador de nível (LIC) atuando sobre a FV. Ambos controladores têm como variável controlada o nível de óleo do separador. O algoritmo atua primeiramente fechando a válvula de controle de pressão do separador (PV) e assim aumentando a pressão e a vazão de saída do mesmo, evitando nível alto no separador. Caso o nível continue subindo, o controlador LIC atua fechando a válvula de entrada do separador (FV) como segunda alternativa de evitar nível alto. Os algoritmos de controle foram implementados na no CLP, em sub-rotina separada.

Os resultados encontrados por (FILHO; MEIRA; VAZ, 2004) durante os testes de comissionamento foram que a amplitude da oscilação de vazão de gás foi reduzida em 40%. A amplitude da oscilação de pressão de gás foi reduzida em 50%. A queima de gás foi

reduzida em 45%. A produção de gás aumentou em 4,3% e a de óleo foi mantida.

Em (CAMPOS; LAUREIRO; FILHO, 2006) são elaboradas duas estratégias de controle, uma estratégia não-linear que atua nas consequências das perturbações (para golfadas menos severas) e uma estratégia de controle override que atua nas causas das perturbações (para golfadas severas). A figura 11 é apresentado um esquema simplificado do processamento de óleo. As duas grandes perturbações para o sistema de produção de óleo são a parada inesperada de uma bomba de exportação ou restrição no recebimento de óleo na plataforma destino e a variação brusca da vazão de produção dos poços. Neste trabalho estamos interessados nas variação brusca de vazão dos poços, golfadas, que afetam a eficiência da separação entre a água, óleo e gás, que pode gerar uma queima indesejável de gás e que também pode levar a uma parada de emergência da plataforma por nível muito alto nos separadores. Neste caso, os controladores PIDs, utilizados tradicionalmente, podem não ser capazes de corrigir a tempo esta variação na produção. Estratégias de controle, que atuam nas causas e nas conseqüências destas perturbações, serão discutidos neste trabalho.

Para viabilizar a implantação dos controles que atuam nas causas das golfadas, evitando que cheguem ao separador de produção, é necessário que as válvulas chokes de controle da produção de óleo de cada poço sejam automatizadas. Na realidade, estes controles tendem a aumentar esta produção, pois se consegue operar com uma abertura média das válvula "choke" maior do que a operação em manual, em caso de "golfadas" severas. Para os controles que atuam nas conseqüências das perturbações, ou seja, aqueles que visam reduzir variações de vazão nas plantas de tratamento de óleo e água, serão utilizadas estratégias de controle de nível não lineares que permitem usar a capacidade dos separadores para amortecer as variações de vazão dos poços e dos oleodutos, sem custo adicional de equipamentos ou perda de produção. Esta é a primeira ação de controle a ser utilizada, e em caso de pequenas "golfadas", ela é capaz de absorver estas perturbações sem comprometer a confiabilidade operacional. Caso as "golfadas" sejam severas, então uma segunda ação de controle atuará nas válvulas "choke".

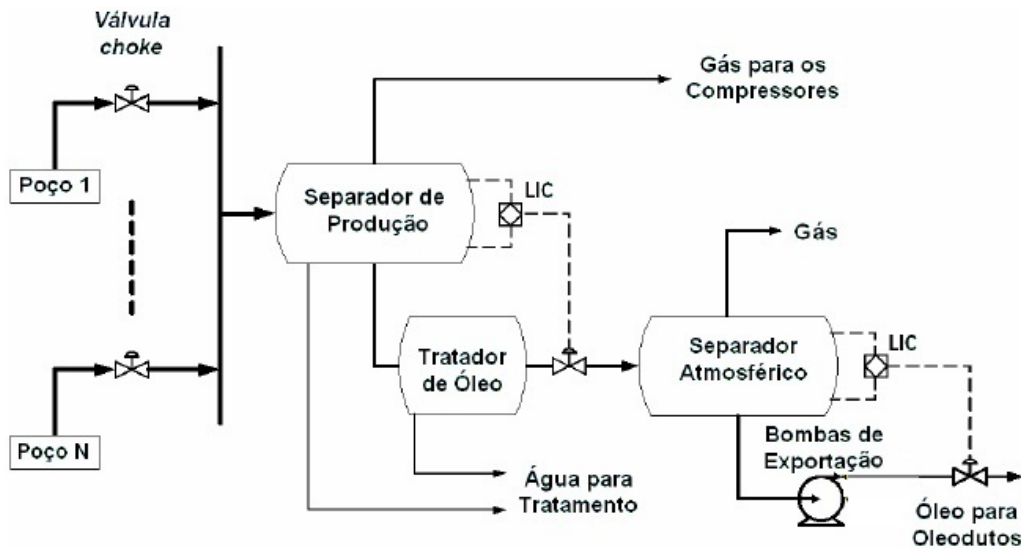


Figura 11: Esquema simplificado do processamento de óleo. Fonte: (CAMPOS; LAUREIRO; FILHO, 2006)

São utilizadas em (CAMPOS; LAUREIRO; FILHO, 2006) estratégias de controle não-linear que permitem usar a capacidade dos separadores para amortecer as variações de vazão dos poços e dos oleodutos são realizadas para os controles que atuam nas consequências das perturbações. Nas golfadas menos severas o controle atua nas consequências das perturbações enquanto que para golfadas severas o controle atua nas causas das perturbações. Foi constatado por (CAMPOS; LAUREIRO; FILHO, 2006) que quanto maior for o período ou a amplitude das "golfadas" ou quanto menor for o tempo de residência da vazão no vaso, maiores serão as perturbações na vazão de saída do separador e na oscilação do nível em torno do "setpoint". Com isso, o desempenho do controlador não-linear depende da escolha dos ganhos e tempos integrais em cada faixa de erro, e esta escolha é função das dimensões dos equipamentos (vasos e válvulas), das vazões médias e dos perfis de perturbações envolvidas (períodos e amplitudes das "golfadas" na vazão de alimentação). Uma regra empírica, mostrada em (CAMPOS; LAUREIRO; FILHO, 2006) para obter esta sintonia é definir o ganho proporcional como sendo a razão entre uma estimativa da perturbação, em percentual da vazão normal de operação, e uma variação de nível aceitável (ver a equação 3.1). Esta variação de nível aceitável está associada com um volume real no separador e acarreta um tempo de residência variável para a perturbação estimada. O tempo integral do controlador PID deve ser igual a quatro vezes este tempo de residência (ver a equação 3.2).

$$K_P = \frac{\Delta Perturbação(\%)}{\Delta Nível(\%)} \quad (3.1)$$

$$K_P = \frac{4x \Delta Volume(\%)}{\Delta Perturbação(\%)} \quad (3.2)$$

Segundo (CAMPOS; LAUREIRO; FILHO, 2006), com a utilização destes controladores "PID Não-Lineares" o sistema é capaz de absorver as "golfadas", sem provocar grandes conseqüências nos processos a jusante, como por exemplo os sistemas de detecção de vazamento, que são sensíveis a estas variações de vazão. Entretanto, se as "golfadas" forem muito severas, então deve-se elaborar um controle para evitá-las, isto é, para atuar nas causas destas perturbações.

Caso as "golfadas" sejam muito severas, (CAMPOS; LAUREIRO; FILHO, 2006) utilizou outra estratégia de controle para tentar eliminar este tipo de escoamento. Onde a variável manipulada será a abertura da válvula choke, que passou a ter função de controle automático (PV), "protegendo o processo", ao contrário de anteriormente onde ela possuía apenas uma função manual. A estratégia de controle dos poços proposta permite minimizar as "golfadas" e evitar possíveis paradas de emergência da plataforma por nível alto nos separadores, atuando nessas válvulas choke automáticas.

(STORKAAS, 2005) desenvolveram um modelo simplificado para descrever o comportamento do sistema quando acontece a golfada. O modelo é adequado para projeto do controlador e análise. Usando este modelo (SIVERTSEN; SKOGESTAD, 2005) foi capaz de prever a variação das propriedades do sistema, como pressão, densidade e frações de fase. Experimentalmente foi encontrada a maior abertura da válvula que dá um funcionamento estável quando nenhum controle é aplicado foi encontrado e é por volta dos 20%.

O modelo ajustado em (SIVERTSEN; SKOGESTAD, 2005) foi usado para realizar uma análise de controlabilidade. Desta forma, foi possível prever quais medidas são ade-

quadas para o controle, evitando assim a golfada. Os pólos do processo para 12% e 25% da abertura da válvula foram encontrados e são respectivamente $-0,0197 \pm 0,01301i$ e $0,0071 \pm 0,1732i$. De acordo com (SIVERTSEN; SKOGESTAD, 2005), como a abertura da válvula de 12% tem pólos no semiplano esquerdo, a execução em malha aberta com esta abertura da válvula vai levar a um fluxo estável no encanamento. No entanto, quando a abertura da válvula é 25% de um par de pólos no semiplano direito indica um sistema instável. Isto significa que ocorrerá golfada quando o sistema é executado com esta abertura da válvula. Para encontrar medidas adequadas para o controle, os zeros para o sistema em malha aberta precisam ser inspecionados, com isso foram inspecionados os zeros para diferentes alternativas de medição. O resultado para P_1, P_2, ρ, F_q e F_w foram respectivamente -1.285 , 46.984 , 0.0092 , -3.958 e -65.587 . Como a medição de P_1 não tem zeros no semiplano direito, não há nenhum problema em particular em usar esta medida.

Então, (SIVERTSEN; SKOGESTAD, 2005) utilizam uma configuração de controle PI em cascata na malha experimental apresentada em (SIVERTSEN; SKOGESTAD, 2005), controle este que utiliza uma medida de pressão na seção de alimentação do encanamento para a malha de controle externa e uma medida de fluxo através da válvula Z no topo do riser na malha de controle interna. Esse controle realizado utilizando o modelo dinâmico simplificado ajustado para essa malha experimental obteve bons resultados e evitou o regime de fluxo de golfadas no sistema de forma satisfatória. Porém, quando o controlador em cascata é utilizado na malha experimental os resultados não foram tão bons.

Em (SAUSEN; BARROS, 2008) foram aplicadas duas estratégias de controle de nível, o controle de nível PI convencional e a metodologia de controle por bandas, com o objetivo de amortecer as vazões de carga oscilatórias que ocorrem em separadores de produção, devido ao regime de fluxo com golfadas. Segundo (SAUSEN; BARROS, 2008), não é aconselhável a aplicação da estratégia de controle de nível convencional que utiliza o nível (i.e., variável controlada) fixo no setpoint, pois as oscilações provenientes do regime de fluxo com golfadas são transferidas para a saída causando perturbações nos equipamentos do processo. Por isso, é utilizada uma metodologia de controle de nível denominada controle por bandas, onde é proposto que durante a atuação do controlador o nível pode variar entre o máximo e o mínimo de uma banda, de modo que as vazões de saída estejam próximas ao valor médio da vazão de entrada.

A adoção desta estratégia dispensa medições de vazão, podendo ser aplicada em qualquer vaso de acúmulo. Neste controle por bandas, quando o nível encontra-se dentro da

banda, utiliza-se a média móvel da ação de controle de um controlador PI lento, pois reduzindo a capacidade de atuação do controlador obtém-se uma maior flutuação do nível de líquido dentro do separador. A média móvel é calculada ao longo de um determinado intervalo de tempo, este intervalo deve ser maior que o período T da golfada. Nos casos em que os limites da banda são ultrapassados, comuta-se a ação de controle em média móvel do controlador PI lento, para um controlador PI de ação rápida por determinado tempo, visando garantir o retorno do nível para dentro da banda e, em caso positivo, a ação de controle volta a ser em média móvel. De modo a evitar variações bruscas na ação de controle durante a comutação entre os modos de operação dentro da banda e fora da banda, é sugerido usar a média entre as ações de controle PI e em média móvel. Como resultado foi observado que com a estratégia de controle PI de nível convencional as vazões de carga (i.e., entrada) são transferidas para a saída do separador, ocasionando perturbações nos equipamentos à jusante do processo. Por outro lado, considerando a estratégia de controle PI de nível por bandas é possível reduzir as oscilações das vazões de exportação a partir das flutuações do nível de líquido dentro do vaso (SAUSEN; BARROS, 2008).

4 *Análise e Resultados das Simulações*

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações realizadas no simulador do sistema encanamento-riser com regime de golfadas, LSimGolf, desenvolvido em C# no Visual Studio 2010 por (ANDRADE, 2011) (ver figura 12). O simulador foi utilizado tanto para análise do comportamento do regime de fluxo de golfadas em malha aberta, quanto para análise de seu comportamento quando aplicadas técnicas de controle com realimentação.

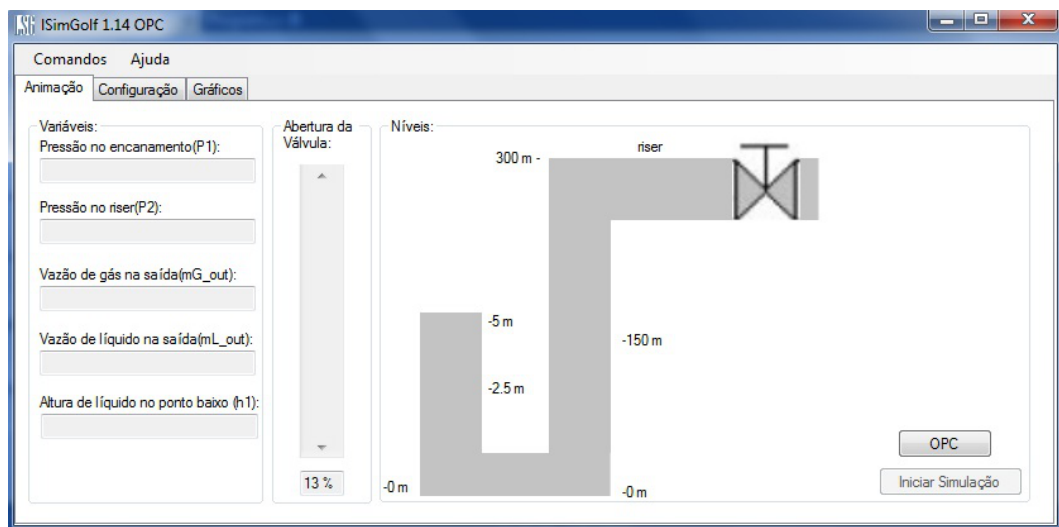


Figura 12: Simulador LSimGolf. Fonte:(ANDRADE, 2011)

Os parâmetros do sistema são os predefinidos no simulador e estão na figura 13.

Para a simulação, a estratégia de controle com realimentação utilizada foi o controle PID. Como mostrou a análise feita por (SIVERTSEN; SKOGESTAD, 2005), a pressão de entrada, P_1 , é a única escolha adequada para quando utilizarmos uma única variável de controle. Para controlar a pressão P_1 , atuamos na válvula de saída do sistema encanamento-riser. Os parâmetros do controlador PID foram encontrados pelo método

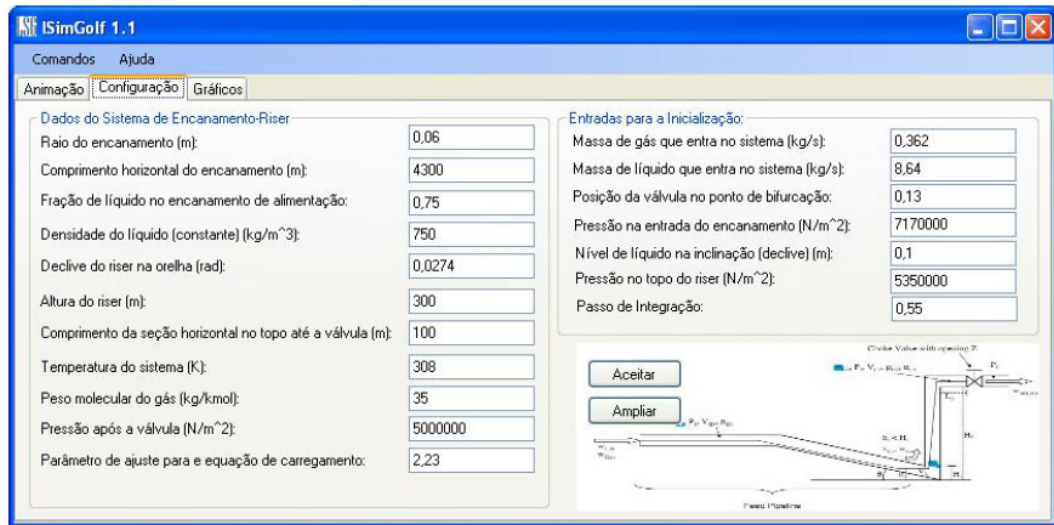


Figura 13: Simulador com os parâmetros utilizados na simulação

da tentativa e erro, com base nos ganhos dos controladores utilizados por *Storkaas et al* e (SIVERTSEN; SKOGESTAD, 2005). Com isso, os ganhos de controladores utilizados foram $K_c = -0.3(10^{-5})$, $T_i = 1000$ e $T_d = 0.01$.

O sistema encanamento-riser sem o controlador obteve como resposta as seguintes pressões, P_1 e P_2 , e os fluxos mássicos, m_G e m_L , mostradas nas figuras 14,15,16 e 17.

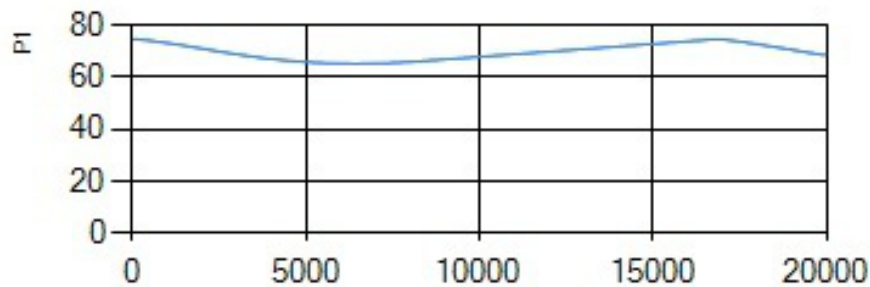


Figura 14: Pressão na ponto baixo do encanamento (P_1)

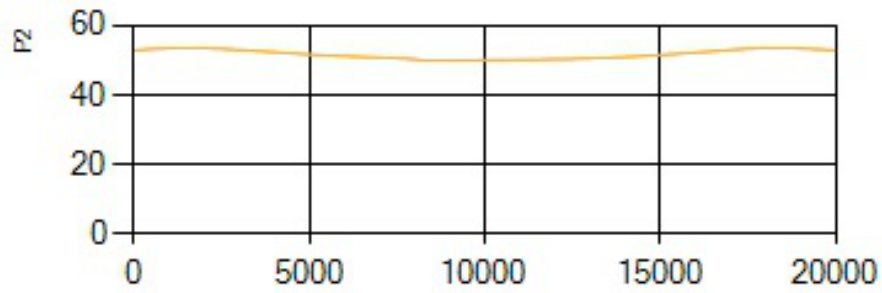


Figura 15: Pressão no ponto alto do encanamento (P_2)

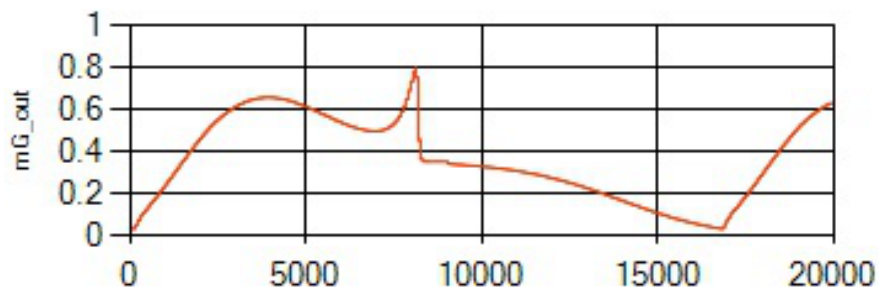


Figura 16: Fluxo mássico de Gás na Saída

O sistema encanamento-riser com o controlador obteve como resposta as seguintes pressões, P_1 e P_2 , e os fluxos mássicos, m_G e m_L , mostradas nas figuras 18,19,20 e 21.

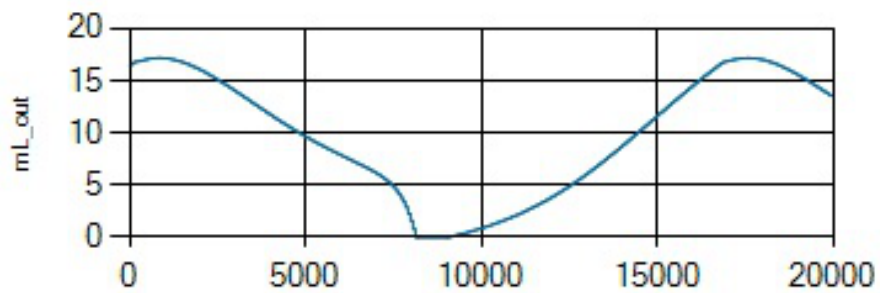


Figura 17: Fluxo mássico de líquido na saída



Figura 18: Pressão na ponto baixo do encanamento (P1)

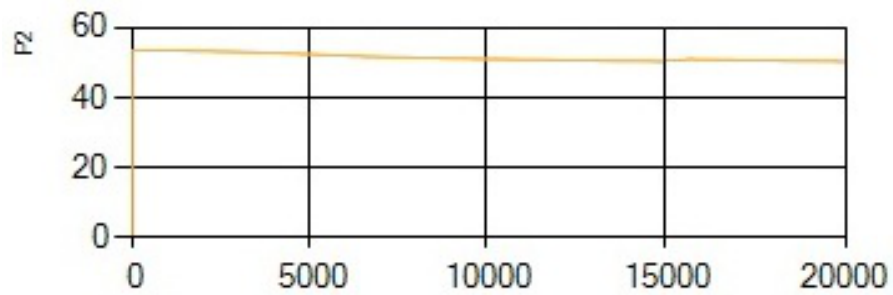


Figura 19: Pressão no ponto alto do encanamento (P2)

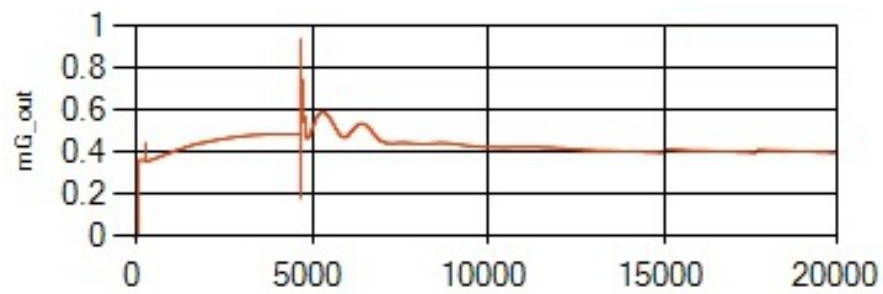


Figura 20: Fluxo mássico de gás na saída

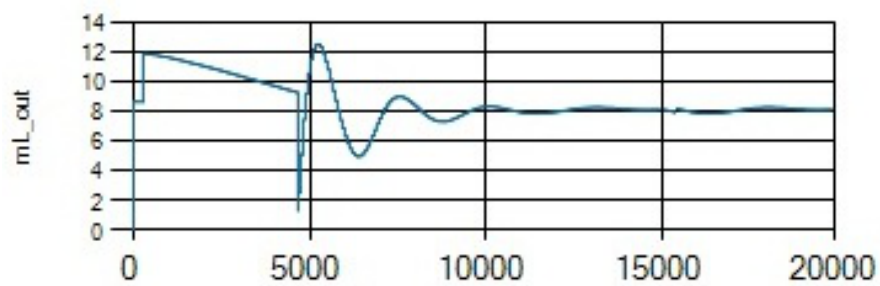


Figura 21: Fluxo mássico de líquido na saída

Verificando a estratégia de controle de pressão PID utilizada, observa-se que o controlador consegue controlar a pressão e assim manter os fluxos controlados. Porém, este controle requer que uma grande movimentação da válvula do topo, de forma a aumentar o seu desgaste ao longo do tempo. Além do fato que para reduzir o fluxo da golfada, a válvula é parcialmente fechada, reduzindo assim a capacidade de produção. Outro problema para a utilização desta estratégia é que a medição da pressão do ponto baixo pode não estar disponível em instalações "offshore" devido a sua localização submarina.

5 *Considerações Finais*

Como visto neste trabalho, o regime de fluxo de golfadas no sistema encanamento-riser ocasiona vazões de carga e exportação oscilatórias em plataformas de produção de petróleo, causando perturbações nos equipamentos do processo e prejuízos econômicos significativos.

Foi realizada uma pesquisa sobre o regime de fluxo de golfadas e as diferentes estratégias de controle utilizadas para manipular este tipo de fluxo. Foram analisadas diversas estratégias de projeto e utilizando realimentação, de forma que foram destacadas as de controle com realimentação.

Com o objetivo de reduzir as variações de vazão de exportação foi implementada uma metodologia de controle de pressão utilizando um controlador PID. Observou que o controlador conseguiu controlar a pressão no ponto baixo do encanamento e manter os fluxos controlados. Porém, este controle requer que uma grande movimentação da válvula do topo e reduz a produção devido ao diminuição da abertura da válvula de saída.

A seguir são apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros para a continuidade da pesquisa: fazer uma sintonia do controlador PID, implementar outras estratégias de controle com realimentação que são largamente utilizadas como o controle de nível PI por bandas nos separadores, além da construção de uma plataforma experimental que descreva o processo sob golfadas.

Referências

- ANDRADE, J. P. P. de. *Modelagem e Simulação de Sistemas de Golfada Trabalho*. [S.l.], 2011.
- CAMPOS, M. C. M.; LAUREIRO, P.; FILHO, A. B. Novas estratégias de controle para a plataforma de petróleo p-55. *Rio Oil e Gas Expo and Conference 2006*, 2006.
- FILHO, A. M. B.; MEIRA, M. A. A. de; VAZ, C. E. M. Sistema de controle de golfadas. *Rio Oil e Gas Expo and Conference*, 2004.
- FILHO, A. M. B.; MEIRA, M. A. A. de; VAZ, C. E. M. Controle de nível em separadores Óleo/gás. *Revista Petro e Química*, 2005.
- JANSEN, F. E. *Elimination of severe slugging in a pipeline-riser system*. [S.l.], 1990.
- LIRA, V. V. *Modelagem Matemática de um Sistema Encanamento-Riser em Fluxo com Golfadas*. [S.l.], 2011.
- POTS, B. F. M.; BROMILOW, I. G.; KONIJN, M. J. W. F. Severe slug flow in offshore flow-line / riser system. *SPE13723*, p. 347–356, 1985.
- RODRIGUES, H. T. *Modelo Matemático Simplificado para Simulação de Intermitência Severa*. [S.l.], 2009.
- RUSCHEINSKY, I. Estudo e aplicação de estratégias de controle em um separador de produção considerando o regime de fluxo com golfadas na produção de petróleo. *Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul*, 2011.
- SAUSEN, A.; BARROS, P. R. Modelo dinâmico simplificado para um sistema encanamento-riser-separador considerando um regime de fluxo com golfadas. *Tendências em Matemática Aplicada e Computacional*, p. 341–350, 2008.
- SCHMIDT, Z.; BRILL, J.; BEGGS, H. Choking can eliminate severe pipeline slugging. *Southwestern Petroleum Short Course*, 1979.
- SIVERTSEN, H.; SKOGESTAD, S. Cascade control experiments of riser slug flow using topside measurements. *16th IFAC World Congress*, 2005.
- STORKAAS, E. *Stabilizing control and controllability: control solutions to avoid slug flow in pipeline-riser systems*. Tese (Doutorado) — Norwegian University of Science and Technology, 2005.
- TAITEL, Y.; JANSEN, F. E.; SHOHAN, O. The elimination of severe slugging experiments and modeling. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 22, p. 10551072, 1996.

TENGESDAL, J. O. *Investigation of self-lifting concept for severe slugging elimination in deep-water pipeline/riser systems*. Tese (Doutorado) — The Pennsylvania State University, 2002.

YOCUM, B. Offshore riser slug flow avoidance, mathematical model for design and optimization. *SPE 4312 European Meeting*, 1973.