

4. CONTROLE DE PIG

Neste capítulo são analisados diversos casos de deslocamento de PIG com controle de velocidade em função da abertura do *bypass* do PIG, para diversas condições de geometria, de escoamento incompressível ou compressível, regime isotérmico ou térmico e efeito *choke*.

Para a verificação inicial da metodologia desenvolvida, investigou-se quatro casos disponíveis na literatura. Nos dois primeiros casos o fluido no interior da tubulação é líquido, tendo sido avaliado por Mirshamsi e Rafeeyan (2012). Já nos dois casos que o PIG se desloca em uma tubulação com gás, selecionou-se dois casos investigados por Nguyen *et al.* (2001).

Após os testes iniciais de verificação, modelou-se um duto para avaliação de diversos cenários diferentes com o objetivo de observar a influência de fenômenos físicos específicos e a robustez do controle para estes cenários.

Por fim, simula-se um caso real no qual a velocidade de deslocamento do PIG sem a utilização do controle é acima da recomendável e com o uso do controle é possível manter a velocidade dentro de valores adequados de modo estável.

O método de controle desenvolvido por Mirshamsi e Rafeeyan (2012) é baseado na *Quantitative Feedback Theory* (QFT), e este controle comanda a abertura e fechamento de uma válvula instalada no corpo do PIG. Assim, a velocidade do PIG é controlada pelo escoamento através do corpo do PIG. Neste método, as equações não lineares referentes ao movimento do PIG são transformadas utilizando o *método Sobhani-Rafeeyan* (método SR) para a utilização do controle QFT, que é resolvido no domínio da frequência. Maiores detalhes são encontrados em Yaniv (1999) e Sobhani e Rafeeyan (2000).

O controle proposto por Nguyen *et al.* (2001) é derivado da função de *Lyapunov* baseado no método de *back-stepping*, neste caso foi escolhido como variável manipulada a perda de carga total k_{total} e para realizar este controle são medidos três parâmetros do sistema, a posição do PIG, velocidade de deslocamento do PIG, a velocidade do escoamento no *bypass* do PIG. Maiores detalhes em Krstic

et al. (1995).

Em relação ao controle PID utilizado nas simulações, o ganho proporcional, o tempo integral e o tempo derivativo foram escolhidos pelo método de tentativa e erro. Inicialmente, considerava-se todos os termos iguais a 1, escolhia-se primeiro o tempo derivativo para variar mantendo as outras constantes, deste modo era observada a sensibilidade deste parâmetro em relação ao controle da abertura. Este processo é iterativo para cada parâmetro do PID até se obter a resposta mais estável e rápida. No capítulo 4.5.4 é feito o teste de sensibilidade dos parâmetros PID.

Para avaliar o coeficiente de descarga, Mirshamsi e Rafeeyan, utilizam um volume de controle com comprimento igual a cinco vezes o comprimento do PIG ($5 l_{pig}$), possuindo um comprimento a montante e jusante do PIG igual a $2 l_{pig}$. O coeficiente de descarga é avaliado em função da diferença de pressão entre os dois extremos deste volume de controle. As forças normais que atuam no PIG são obtidas de forma indireta, através de dois balanços de quantidade de movimento a montante e jusante do PIG, incluindo naturalmente os efeitos gravitacionais e viscosos no fluido. A força de contato estático e dinâmico do PIG com a parede é definida como proporcional a normal à parede N ; $F_{st} = \mu_{st} N$, $F_{dyn} = \mu_{dyn} N$, onde μ_{st} e μ_{dyn} são os coeficientes de atrito estático e dinâmico. A normal é avaliada como sendo igual ao peso do PIG no caso de tubulação horizontal, $N = m_{pig} g$, no caso de topografias mais complexas a normal depende da inclinação e da curvatura do relevo.

4.1. Caso1: escoamento de Líquido

Este teste visa avaliar a metodologia de controle PID em função da abertura de uma válvula no corpo do PIG para escoamento isotérmico de líquido. Utiliza-se para comparação dois casos analisados no trabalho de Mirshamsi e Rafeeyan (2012), correspondendo a diferentes topografias de tubulação, considerando os demais parâmetros iguais.

A tubulação possui diâmetro nominal $D = 0,25$ m e comprimento igual a $L = 30$ m. Em função da ausência de dados referente a espessura e rigidez da tubulação, considerou-se o duto como rígido.

Como fluido de trabalho utilizou-se a água com massa específica de referência $\rho_{ref} = 1000$ kg/m³, constante em função do efeito da compressibilidade

não ser relevante neste caso. Considerou-se ainda a viscosidade constante e igual a $\mu_f = 10^{-3}$ Pa s.

Como condição de contorno, foi prescrita velocidade de entrada na tubulação de $U_{in} = 6$ m/s, devido à ausência de informações, definiu-se um pressão de recebimento igual a $p_t = 1,0$ MPa.

No artigo de Mirshamsi e Rafeeyan (2012), o PIG foi definido com massa, comprimento e diâmetro máximo de furo de *bypass* iguais a $m = 50$ kg, $l_{pig} = 0,3$ m e $d_v = 0,12$ m, respectivamente. Pela ausência de informação, admitiu-se que o PIG possui uma perda de carga máxima no *bypass* $K_V = 0,8$, linearmente proporcional a fração de abertura α , e que não existe amortecimento ($C=0$ N s/m). Em função ausência de informação com relação a diversos parâmetros do problema, a comparação com o modelo tende a ser mais qualitativa que quantitativa.

Os coeficientes de atrito utilizados por Mirshamsi e Rafeeyan (2012), valem respectivamente $\mu_{dyn} = 0,2$ e $\mu_{dyn} = 0,3$. Inicialmente a força de contato foi estimada como $F_{st} = \mu_{st} N$, $F_{dyn} = \mu_{dyn} N$, conforme Mirshamsi e Rafeeyan (2012). Porém, resultados preliminares mostraram que mesmo com o *bypass* do PIG totalmente aberto, não era possível reduzir a velocidade ao valor desejado. Uma das razões está associada ao fato da força de contato utilizada no artigo ser proporcional ao peso do PIG. Este valor é muito baixo, pois na formulação do artigo, utiliza-se uma diferença de pressão entre montante e jusante do PIG referentes a posições afastadas de $2 l_{pig}$ a montante e $2 l_{pig}$ a jusante. As forças normais na superfície do PIG na direção do escoamento dependem de um C_V baseado numa diferença de pressão, que é muito maior do que a empregada na presente formulação, compensando o efeito da pequena força de contato. No presente modelo as forças devidas à diferença de pressão do PIG na direção do escoamento são avaliadas nas faces do PIG. Logo, nas simulações realizadas para este caso, utilizou-se os seguintes valores de força de contato: $F_{st} = 16720$ N, $F_{dyn} = 10720$ N, as quais acreditamos sejam mais realistas Tolmasquim (2004).

De acordo com a referência, a velocidade desejada de deslocamento do PIG (*set-point*) foi definida como $SP = 3,0$ m/s. Pelo método de tentativa e erro, escolheu-se o ganho proporcional, o tempo integral e o tempo derivativos iguais a $K_p = 1$, $\tau_i = 0,5$ s e $\tau_d = 0$ s, respectivamente para o controle PID relativo ao deslocamento do PIG. Neste caso, o controle é somente proporcional e integral (PI)

e os mesmos parâmetros são utilizados para ambos os casos. Além disso, o *bypass* do PIG é definido no início do processo como totalmente aberto $\alpha_0=100\%$.

Inicialmente, o escoamento no interior do duto encontra-se em regime permanente. Os casos simulados são referentes ao transiente de lançamento do PIG. A condição inicial do PIG referente a posição S_0 e a velocidade V_{p0} são nulas.

4.1.1. Caso 1.1: Deslocamento Ascendente a 45°

A topografia utilizada neste caso foi uma subida com inclinação fixa de 45°, conforme ilustrado na Figura 4.1, sendo dada pela relação

$$H = x \quad (4.1)$$

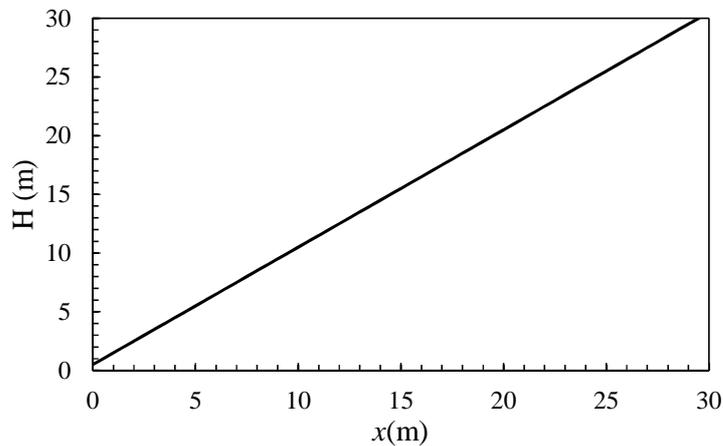


Figura 4.1 – Topografia Caso 1.1

Na Figura 4.2 pode ser visualizada a variação da velocidade do PIG em função do tempo, ao longo da tubulação. Na mesma figura estão incluídos os resultados obtidos sem controle com a válvula totalmente aberta ($\alpha_0=100\%$) e totalmente fechada ($\alpha_0=0\%$), e os dados com controle PID obtidos no presente trabalho, juntamente com os dados com controle obtidos por Mirshamsi e Rafeeyan (2012). Observa-se que se não houver válvula, ou se estiver totalmente fechada, não é possível obter uma velocidade aceitável para o PIG. Nota-se também, que se a válvula estiver totalmente aberta, o PIG se desloca com velocidade abaixo do que o desejado. O controle só será efetivo, se for utilizada uma válvula, cuja abertura máxima garante velocidade de deslocamento do PIG abaixo do *set-point*. Neste caso, a estratégia de controle em função da abertura utilizando a metodologia PID

mostra-se eficiente para controlar a velocidade do PIG, já que foi obtida a velocidade desejada, a qual é 50% menor do que a velocidade de deslocamento do PIG sem *bypass*. Ambas as metodologias de controle levaram três segundos para estabilizar a velocidade do PIG no valor de *set-point*. Porém, a aceleração inicial obtida com o presente método PID de controle foi maior do que o apresentado na referência, se aproximando mais rapidamente do valor desejado de velocidade de deslocamento.

O percentual de abertura do *bypass* para o controle PID ficou em 80%, enquanto que no artigo ficou em 11%. Esta diferença, está diretamente relacionada aos parâmetros do PIG, como a força de contato e a dependência do coeficiente de descarga com a fração de abertura. Como mencionado, alguns dados importantes não foram fornecidos no artigo, tendo sido arbitrados de acordo com valores típicos encontrados na literatura.

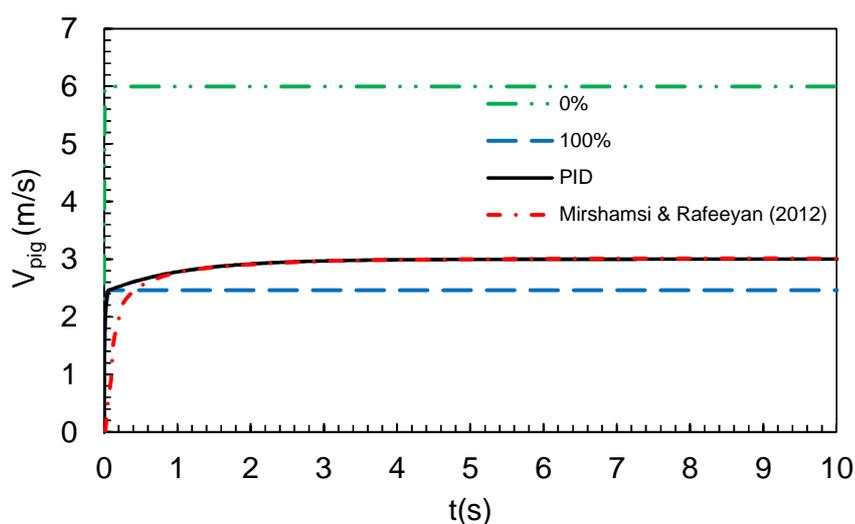


Figura 4.2 – Controle de velocidade do PIG no lançamento. Líquido, caso 1.1

4.1.2. Caso 1.2: Descida Senoidal

A topografia do segundo caso analisado por Mirshamsi e Rafeeyan (2012) e selecionado para ser investigado aqui é ilustrada na Figura.4.3. Neste caso, a topografia do duto é mais complexa, correspondendo a uma descida senoidal, sendo dada por

$$H = -0,5 (x + \text{sen } x) \quad (4.2)$$

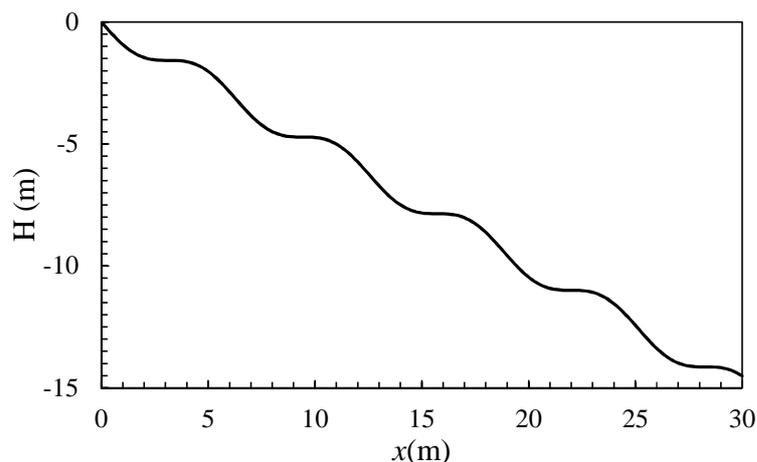


Figura 4.3 – Topografia Caso 1.2

De forma análoga ao apresentado na Figura. 4.2, apresenta-se na Figura. 4.4 a variação temporal da velocidade do PIG obtida neste trabalho com o controle PID juntamente com os dados com controle obtidos por Mirshamsi e Rafeeyan (2012) e com os dados obtidos sem controle, com a válvula totalmente aberta e totalmente fechada. Note na Figura. 4.4 que na situação sem controle com *bypass* totalmente aberto, a velocidade do PIG oscila ao longo da tubulação, em função das ondulações encontradas na geometria, e permanece em torno de 2,6 m/s, valor também inferior ao desejado. No caso do deslocamento do PIG sem furo de *bypass*, o PIG atinge o mesmo nível de velocidade que no Caso 1.1, aproximadamente 6 m/s. Observa-se ainda que, mais uma vez, o presente modelo de controle PID mostrou-se eficiente, inclusive ligeiramente melhor que o modelo de controle utilizado na referência. Como no caso anterior, a velocidade de 3 m/s foi atingida em ambos os casos, com uma aceleração maior no início do transiente com controle PID, se aproximando mais rapidamente do valor de *set-point*. Após aproximadamente 1 segundo, os dois modelos de controle coincidem, ambos fornecem velocidade estável de deslocamento, apesar das ondulações da topografia.

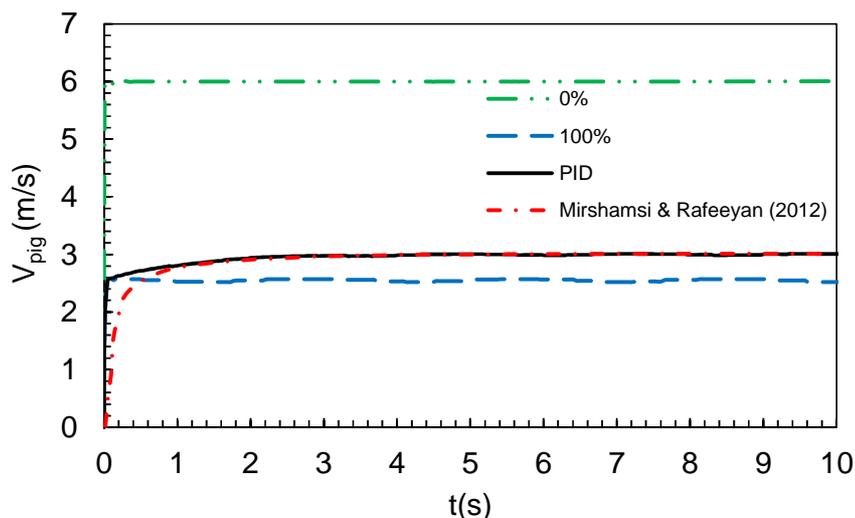


Figura 4.4 – Controle de velocidade do PIG no lançamento. Líquido, Caso1.2.

O percentual de abertura do *bypass* com controle PID ficou em 83%, enquanto que no artigo ficou em 40%, isto se deve diferenças nos parâmetros utilizados nas modelagens, como já ressaltados no Caso 1.1, além naturalmente do método de controle.

4.2. Caso 2: Escoamento de Gás

Após a validação de dois casos bem-sucedidos para líquidos, o comportamento do controle do PIG foi analisado com relação à escoamento em gasodutos. Ambos os casos são baseados no trabalho de Nguyen *et al.* (2001). O Caso 2.1 refere-se ao lançamento do PIG em um duto com escoamento em regime permanente. No Caso 2.2, o PIG encontra-se preso no interior da tubulação e em função do aumento de pressão a montante, este se solta e se desloca ao longo do gasoduto.

A configuração utilizada por Nguyen *et al.* (2001) refere-se a uma tubulação horizontal com escoamento de gás com comprimento $L=2,0$ km, diâmetro interno $D=0,7366$ m. Neste caso, como no anterior, a compressibilidade do duto não foi informada na referência. Logo, informações adicionais são necessárias, considerou-se o duto com $e=1$ mm de espessura, sendo o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson iguais a $E=2,0 \times 10^{11}$ Pa e $\mu=0,3$.

O fluido transportado é gás natural com constante de gás igual a $R=518,30$ J/(kg K), sendo a viscosidade dinâmica igual a $\mu_f=1,45 \times 10^{-5}$ m²/s. A

compressibilidade do gás foi desprezada ($Z=1,0$) e a condutividade térmica e calor específico a pressão constante foram definidos com $K=0,1314 \text{ W/(mK)}$ e $c_p=1814 \text{ J/(kg K)}$, respectivamente.

O PIG possui massa $m=2320 \text{ kg}$, comprimento $l_{pig}=2,00 \text{ m}$, diâmetro de *bypass* $d_v=0,1778 \text{ m}$, como na referência. As pressões de atrito estático $P_{st}=F_{st}/A$ e dinâmico $P_{dyn}=F_{dyn}/A$ valem respectivamente $2,00 \text{ bar}$ e $0,33 \text{ bar}$, sendo A a área da tubulação, o coeficiente de amortecimento vale $C=0,74 \text{ N.s/m}$. O coeficiente de vazão na válvula totalmente aberta foi considerada como igual a $C_{Vmax}=1000\text{gpm.psi}^{-0,5}$, com vazão proporcional à variação percentual da abertura da válvula. Estas duas últimas informações não foram disponibilizadas por Nguyen *et al.* (2001). Especificou-se uma velocidade de deslocamento (*set-point*) de $V_{pig}=2,5\text{m/s}$.

Para ambos os casos, avalia-se a velocidade de deslocamento do PIG sem controle (com *bypass* totalmente fechado) e com controle PID, comparando-se os resultados com Nguyen *et al.* (2001), utilizando sua metodologia de controle.

4.2.1. Caso 2.1 Lançamento do PIG

Neste caso, inicialmente gás escoava em regime permanente ao longo do duto. Deseja-se investigar uma operação de lançamento de PIG no duto.

De acordo com a referência, o gás entra na tubulação com vazão mássica $\dot{m}_n=6,3104 \text{ kg/s}$. Na saída a pressão é mantida em $p_{out}=7,65 \text{ bar}$, valores impostos como condição de contorno do problema.

A temperatura de escoamento na entrada foi definida igual à temperatura externa, de 15 °C , com coeficiente global de transferência de calor igual a $U_e = 2 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$.

A condição inicial do PIG referente a posição S_0 e velocidade V_{p0} são nulas, sendo a velocidade desejada para o PIG (*set-point*) $V_p = 2,5 \text{ m/s}$.

Os parâmetros de controle PID referentes ao ganho proporcional, ao tempo integral e ao tempo derivativo foram escolhidos como iguais a $K_p = 1$, $\tau_i = 1,0 \text{ s}$ e $\tau_d = 0 \text{ s}$, respectivamente.

A Figura 4.5 apresenta a variação temporal da velocidade do PIG obtida sem *bypass*, com controle PID iniciando fechado ($\alpha=0\%$), com controle PID iniciando

aberto ($\alpha=100\%$) e compara com os dados obtidos por Nguyen *et al.* (2001). A Figura 4.6 mostra o zoom da Figura 4.5 no tempo para melhor observação do transiente inicial. Observa-se que sem *bypass*, o deslocamento é instável, com variações bruscas da velocidade. Note que para a ativação do controle PID em uma válvula inicialmente totalmente aberta, o PIG só começou a se deslocar após aproximadamente 0,5 s, quando a diferença de pressão entre montante e jusante do PIG ultrapassou seu valor de resistência estática. Observando a Figura 4.6, pode-se notar que devido ao retardo no deslocamento do PIG, a diferença de pressão causou uma aceleração grande demais, o que levaria a altas velocidades de deslocamento. No entanto, devido à atuação do controle PID, através de fechamento e abertura da válvula no corpo do PIG, houve um decréscimo da velocidade, logo recuperado até se estabilizar no valor desejado de 2,5 m/s. Por outro lado, quando o controle PID é ativado em uma válvula inicialmente fechada, observa-se um comportamento mais estável, sem oscilações, com uma aceleração instantânea maior que a obtida na referência, se aproximando mais rapidamente do valor especificado (*set-point*) da velocidade de deslocamento do PIG. Pode-se afirmar que um bom resultado foi obtido, pois em ambas as situações de abertura inicial da válvula, o método PI foi capaz de estabilizar a velocidade do PIG no valor desejado de 2,5 m/s, assim como o método de controle da referência (que não informa a abertura inicial do *bypass*). O percentual de abertura após estabilização ficou em 21%, e não é possível comparar este parâmetro com Nguyen et al (2001) já que o artigo não fornece este parâmetro.

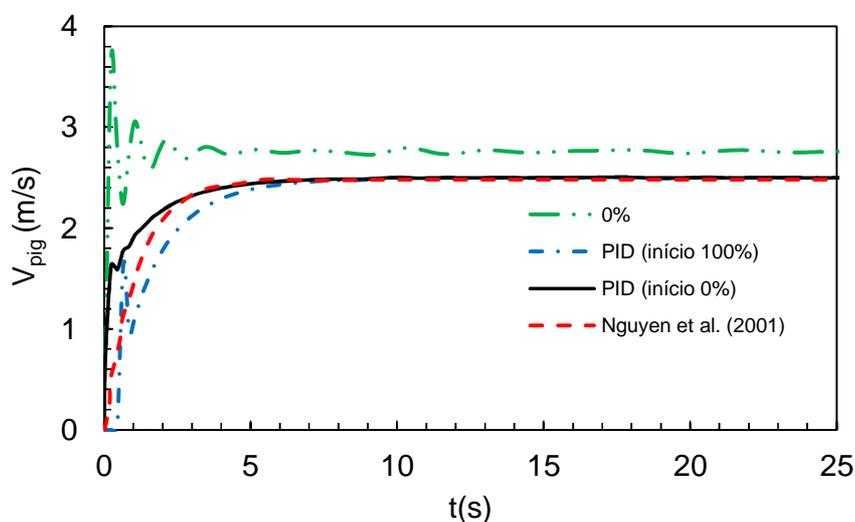


Figura 4.5 – Controle de velocidade do PIG no lançamento. Gás. Caso 2.1

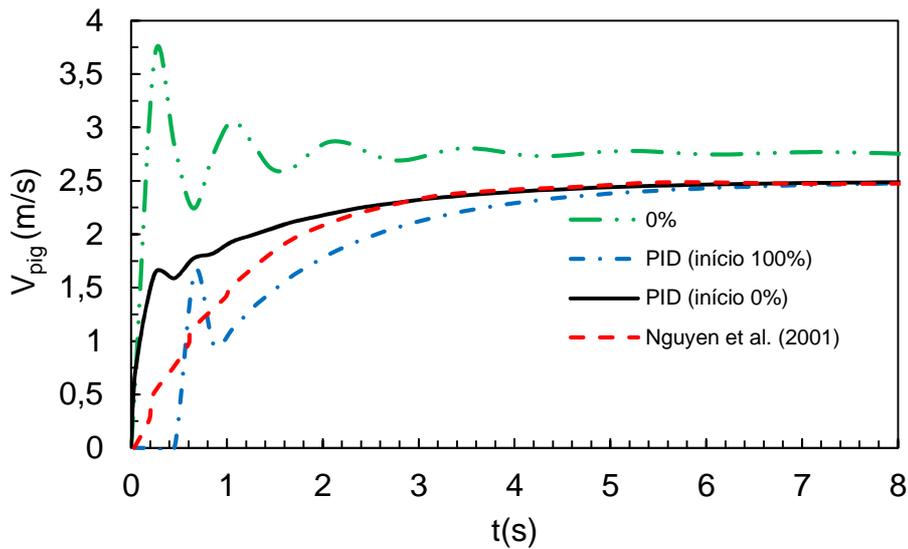


Figura 4.6 – Controle de velocidade do PIG no lançamento. Gás. Caso 2.1 com zoom

O caso do PIG com furo de *bypass* totalmente aberto sem controle também foi simulado, porém o diferencial de pressão obtido não foi suficiente para deslocar o PIG em função do fluxo de gás escoando pelo furo do *bypass*.

Outro teste realizado referente a este caso, foi a eliminação da dilatação da tubulação, uma vez que esta informação não foi fornecida por Nguyen *et al.* (2001). Porém não houve diferenças perceptíveis, já que os níveis de pressão não foram tão elevados de forma a alterar significativamente o diâmetro da tubulação.

4.2.2. Caso 2.2: Desbloqueio de Tubulação

Neste caso considera-se que o PIG travou na tubulação em função de detritos e para desbloquear a linha pressurizou-se a montante do PIG até ele começar a se deslocar ultrapassando o atrito estático. A posição inicial do PIG $S_0 = 0,667$ km e a velocidade inicial V_{p0} nula. Assim como no teste anterior, deseja-se que a velocidade de deslocamento do PIG seja de 2,5 m/s.

A condição de contorno não foi informada explicitamente no exemplo 2 de Nguyen *et al.* (2001). Dessa forma, utilizou-se a mesma condição e a mesma pressão na saída ($p_{out} = 7,65$ bar) que no Caso 2.1 e avaliou-se diferentes cenários com relação a condição de contorno na entrada, sabendo que a partir da aplicação de seu método de controle, Nguyen *et al.* (2001) conseguiu deslocar o PIG após 30s da operação de desbloqueio, atingindo rapidamente a condição desejada de

deslocamento.

O ganho proporcional, o tempo integral e o tempo derivativo do controle PID foram escolhidos, por tentativas, como iguais a $K_p = 10$, $\tau_i = 4,0$ s e $\tau_d = 0,1$ s, respectivamente. Estes valores se manteve fixo para todas as simulações desta secção.

Assim como nos casos anteriores, como primeira etapa do teste investigou-se o comportamento do PIG na tubulação na ausência de controle e sem *bypass*, pois é o cenário mais crítico.

Inicialmente, assumiu-se que a mesma vazão na entrada do duto do teste anterior seria imposta, partindo do repouso, pois com o PIG parado não há escoamento no duto. Com o aumento da vazão na entrada partindo de zero até $\dot{m}_{in} = 6,3104$ kg/s, ocorre um aumento no diferencial de pressão através do PIG, conforme ilustrado na Figura. 4.7. Uma vez vencida a resistência estática, em aproximadamente 50 s após o início da operação, o PIG se desloca, atingindo alta velocidade. Com o deslocamento do PIG, o atrito dinâmico passa a atuar, e o diferencial de pressão cai significativamente, ocasionando a interrupção de seu movimento. Observa-se que como o gás continua sendo injetado com vazão constante, o nível de pressão volta a subir, mas não suficiente para deslocar o PIG antes de 100 s (ver Figura. 4.7), pois o diferencial de pressão não venceu a resistência estática durante esse período.

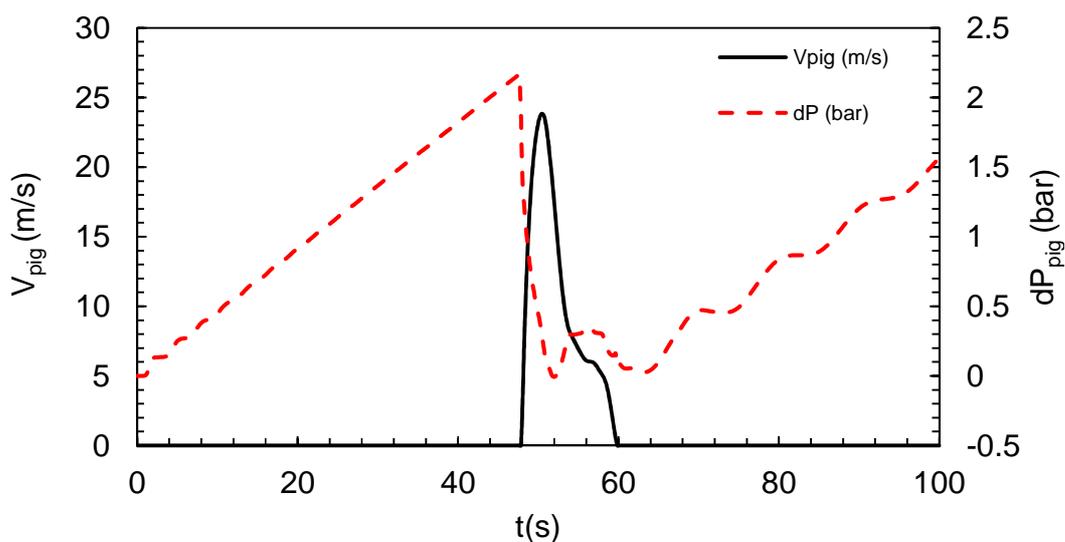


Figura 4.7 – Velocidade e Diferencial de Pressão no PIG. Após transiente o PIG para.

Deste modo, foi considerado uma segunda condição de contorno na entrada, mantendo a mesma condição anterior de pressão de recebimento $p_{out}=7,65$ bar. Neste caso, aumentou-se a vazão de envio para $\dot{m}_{in}=15,0$ kg/s, valor suficiente para manter o PIG se deslocando após o transiente inicial.

A Figura 4.8 apresenta a variação temporal da velocidade do PIG obtida sem controle e sem *bypass*, com controle PID iniciando com válvula fechada ($\alpha=0\%$) e compara com os dados obtidos através do controle proposto por Nguyen *et al.* (2001). Observa-se que sem *bypass*, o deslocamento é instável, com variações bruscas da velocidade, num patamar acima do desejável. O controle PID consegue amenizar o transiente inicial com relação ao caso do PIG sem *bypass*, mas velocidades muito elevadas foram obtidas. Com a abertura da válvula, a velocidade cai. Porém para manter a velocidade do PIG no patamar desejado a válvula volta a fechar, o que resultou em uma oscilação no instante $t=40$ s. Finalmente, após 55s, o método de controle PID conseguiu manter a velocidade controlada, porém o controle de Nguyen *et al.* (2001) impediu a variação brusca do PIG no transiente inicial e manteve a velocidade controlada durante todo o período. A defasagem de tempo ocorrida entre o caso de Nguyen para os demais é devido à diferença de vazão da entrada entre os métodos.

É importante frisar que não foram informadas as características referente a perda de carga da válvula além das condições de contorno do problema, o que dificulta uma comparação direta.

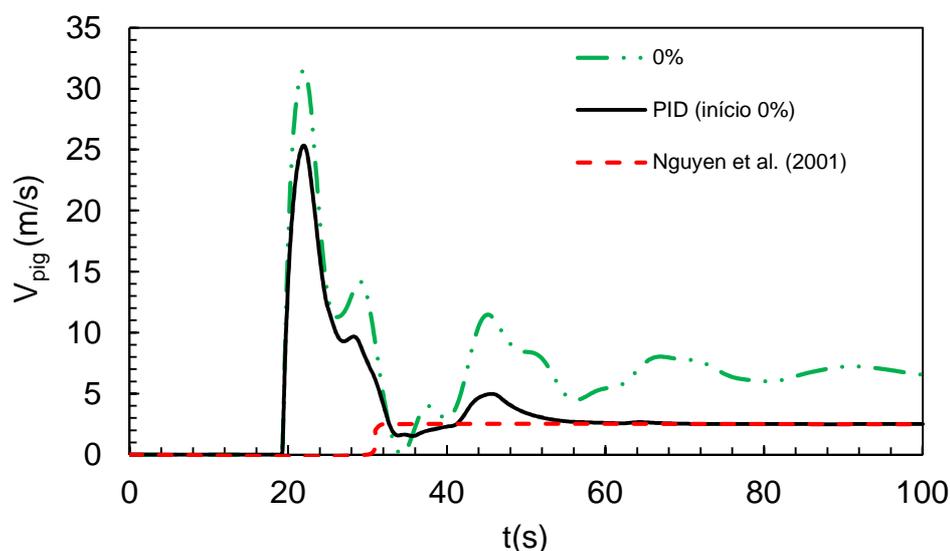


Figura 4.8 – Velocidade do PIG no desbloqueio. Gás. Caso 2.2

A Figura 4.9 mostra o comportamento do diferencial de pressão no PIG sem controle e sem *bypass*, e com controle PID e compara com Nguyen *et al.* (2001). Observa-se que com o controle PID ativado o diferencial de pressão fica um pouco mais estável do que sem o controle. No entanto, o comportamento do diferencial de pressão no trabalho de Nguyen *et al.* (2001) é menos inclinado do que os outros, o que indica uma variação mais lenta de pressão, o que causa uma demora maior para o PIG reagir. O patamar final é o mesmo para os três casos, o que indica que o diferencial de pressão no PIG é exatamente igual durante o regime permanente.

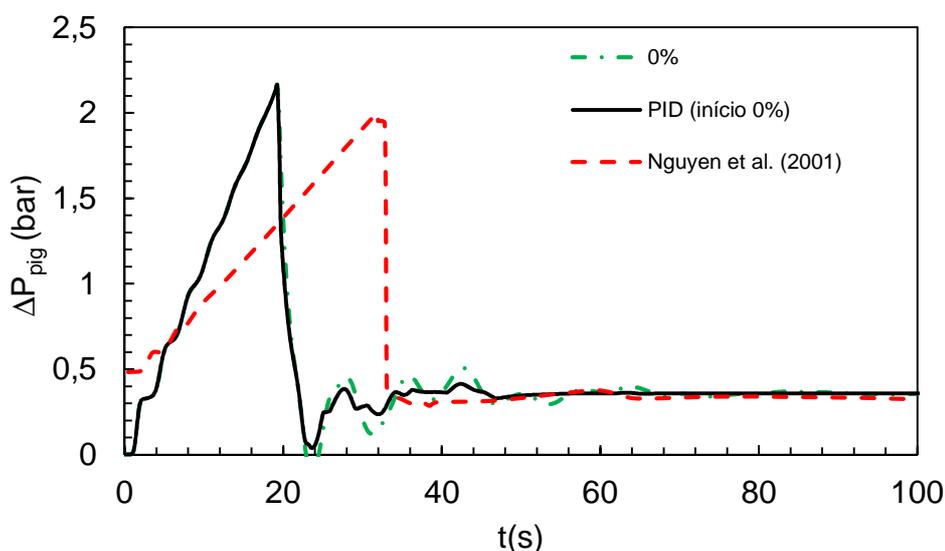


Figura 4.9 – Diferencial de pressão do PIG no desbloqueio. Gás. Caso 2.2

A Figura 4.10 apresenta o percentual de abertura da válvula de *bypass*, com controle PID iniciando com válvula fechada ($\alpha=0\%$). Neste caso, observa-se quando o diferencial de pressão no PIG supera a força estática, o PIG começa a se deslocar, mas como a força de atrito dinâmico é muito menor, o PIG acelera muito, aumentando rapidamente a velocidade, o que causa a total abertura da válvula de controle (~20s). A abertura total da válvula levou a uma desaceleração grande demais, ocasionando o fechamento da válvula (25s). Analisando simultaneamente os gráficos das Figuras. 4.8 a 4.10, observa-se a abertura e fechamento da válvula diretamente relacionado com as altas acelerações e desacelerações do PIG. Somente após 40s, o controle PID atua de forma mais efetiva e partir de $t=50$ s as oscilações diminuem e vão reduzindo até atingir no tempo final. Os parâmetros de ajuste PID (ganho proporcional, o tempo integral e o tempo derivativos) são críticos para o funcionamento adequado no método.

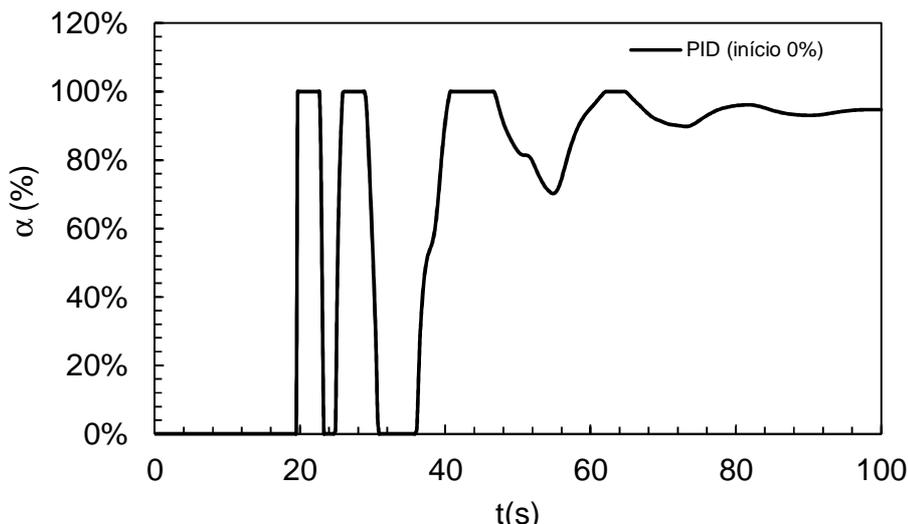


Figura 4.10 – Percentual de abertura do PIG no desbloqueio. Gás. Caso 2.2

Ainda analisando a Figura 4.9, observa-se também que o diferencial de pressão através do PIG no instante inicial imposto por Nguyen *et al.* (2001) é maior que o utilizado no presente teste, o que acabou ocasionando um transiente mais rápido de pressão. Nota-se ainda que o diferencial de pressão que ocasionou o deslocamento do PIG obtido no presente teste foi maior que o da referência, o que pode justificar o alto nível de velocidade de deslocamento do PIG obtido.

A Figura 4.11 ilustra a variação da temperatura do gás imediatamente a montante do PIG. Observa-se um aumento em torno de 20°C em função da compressão do gás na tubulação. Após a estabilização da velocidade do PIG e a redução da pressão, a temperatura estabiliza em torno de 19 °C.

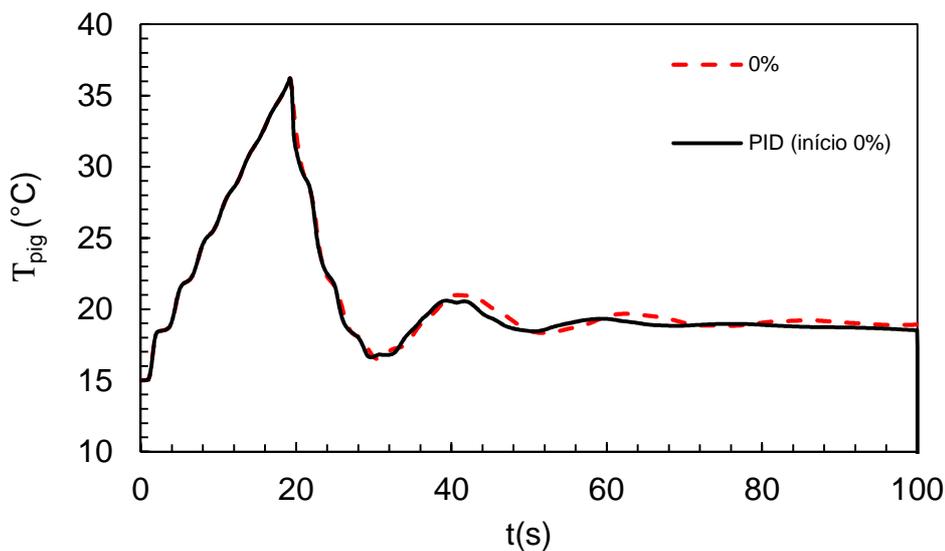


Figura 4.11 – Temperatura do PIG no desbloqueio. Gás. Caso 2.2.

Em função das diferenças obtidas com os testes realizados e os resultados do caso simulado por Nguyen *et al.* (2001), mais um teste foi realizado com nova condição de contorno na entrada. Neste caso, optou-se por prescrever uma condição de pressão no envio. Analisando os dados de Nguyen *et al.* (2001) na Figura. 4.9, observa-se que em $t=0$, a pressão a montante do PIG é 0,5 bar acima da pressão a jusante. Dessa forma, procurou-se reproduzir esta situação. Como condição inicial, uma distribuição uniforme de pressão foi imposta, correspondendo a uma situação sem escoamento em uma tubulação horizontal. Um valor de pressão no expedidor (entrada) igual a 0,5 bar acima da pressão de recebimento (saída) foi imposto. Admitindo não ser possível aumentar de forma instantânea a pressão no expedidor, impôs-se um intervalo de 0,1s para atingir o valor desejado. Além da rampa para o PIG iniciar o movimento, é importante destacar que para atingir o valor desejado de velocidade de deslocamento do PIG em regime permanente, precisa-se impor uma rampa de 5s (de 30s a 35s) para redução na pressão do expedidor, conforme ilustrado na figura. Se esta rampa for instantânea, surge uma onda de pressão que provoca um diferencial no PIG menor do que o necessário para mantê-lo em movimento.

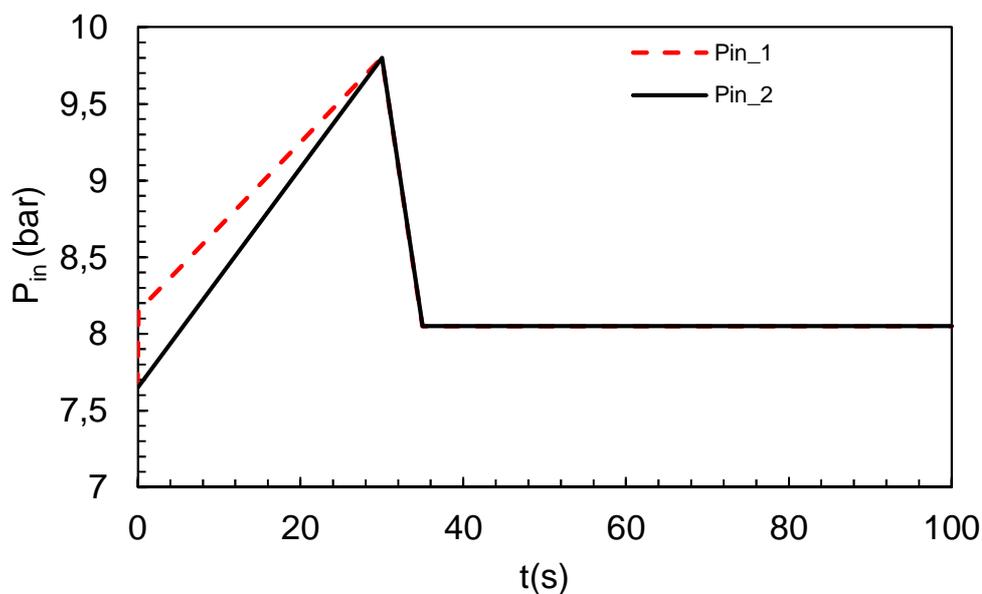


Figura 4.12 – Pressão imposta na entrada com pulso (Pin_1) e sem pulso inicial (Pin_2) no desbloqueio. Gás. Caso 2.2.

A Figura 4.13 mostra o diferencial de pressão através do PIG e variação da velocidade no PIG com a rampa de pressão imposta na entrada. Observa-se que a velocidade começou a aumentar num instante de tempo semelhante a obtida por Nguyen *et al.* (2001), porém continuou-se obtendo alta velocidade durante o transiente inicial, mas após 60s a velocidade do PIG se manteve estável e igual ao *set-point*. Observa-se ainda que o diferencial de pressão ficou oscilando antes do PIG se movimentar, isto ocorreu em função da pressão inicial da rampa imposta, já que a pressão aumentou 0,5 bar em 0,1s, deste modo a onda de pressão provocada neste transiente se desloca até o PIG e retorna para origem.

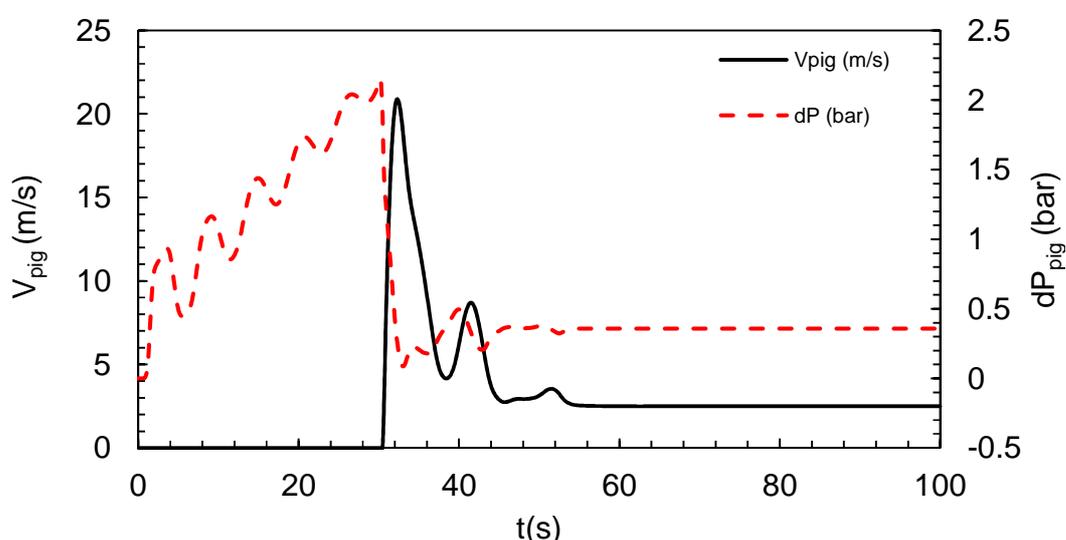


Figura 4.13 – Velocidade e Diferencial de Pressão no PIG. Oscilação da pressão diferencial no PIG.

A Figura 4.14 mostra o perfil de velocidade e de pressão ao longo da tubulação para 6 instantes de tempo diferentes de 1 a 6s. É possível observar que a onda de pressão e a velocidade se deslocam ao longo da tubulação, a velocidade atinge o valor mínimo em $t=5s$, a partir de $t=6s$ ela volta a aumentar. Além disso a pressão aumenta e atinge valor máximo em $t=4s$ e depois reduz a partir de $t=5s$. Este comportamento acompanha a primeira oscilação da Figura 4.13, e é oriunda da onda provocada pelo pulso de pressão em $t=0,1s$, explicando as oscilações existentes no diferencial de pressão.

Em função deste resultado, foi realizada uma nova simulação considerando que a pressão inicial da rampa começa com a pressão hidrostática, ou seja, não considerando o diferencial de pressão já existente no início. A pressão imposta é a

Pin_2 e se encontra ilustrada na Figura 4.12. Os demais pontos da rampa de pressão e os demais parâmetros se mantiveram os mesmos.

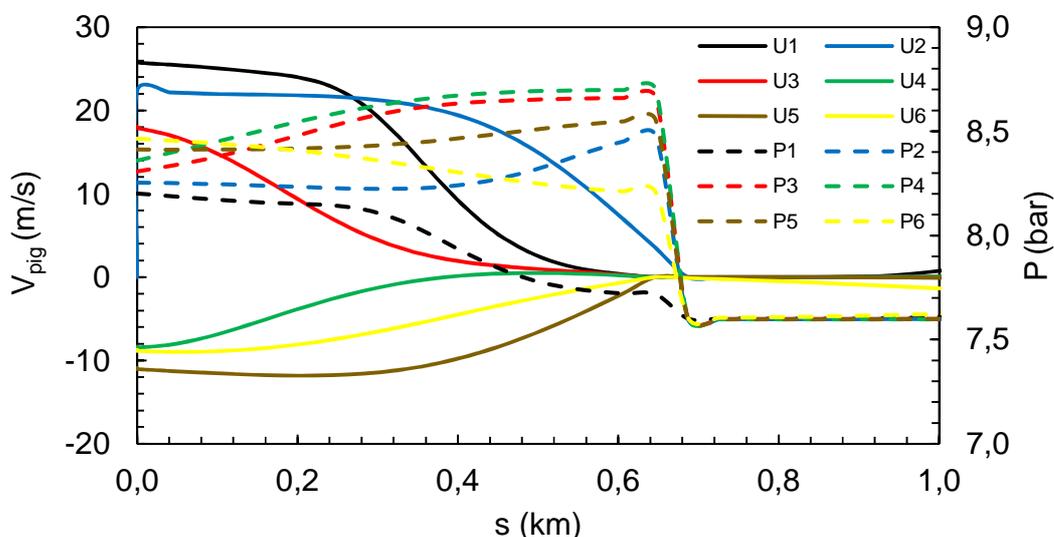


Figura 4.14 – Velocidade e Diferencial de Pressão no PIG. Oscilação da pressão diferencial no PIG ao longo do duto.

A Figura 4.15 mostra a comparação entre os diferenciais de pressão no PIG de Nguyen *et al.* (2001) e do controle PID com a nova rampa de pressão. Observa-se que o comportamento do salto de pressão através do PIG fica semelhante e com oscilações reduzidas, o que mostra como a condição inicial de pressão no expedidor influencia no diferencial de pressão no PIG.

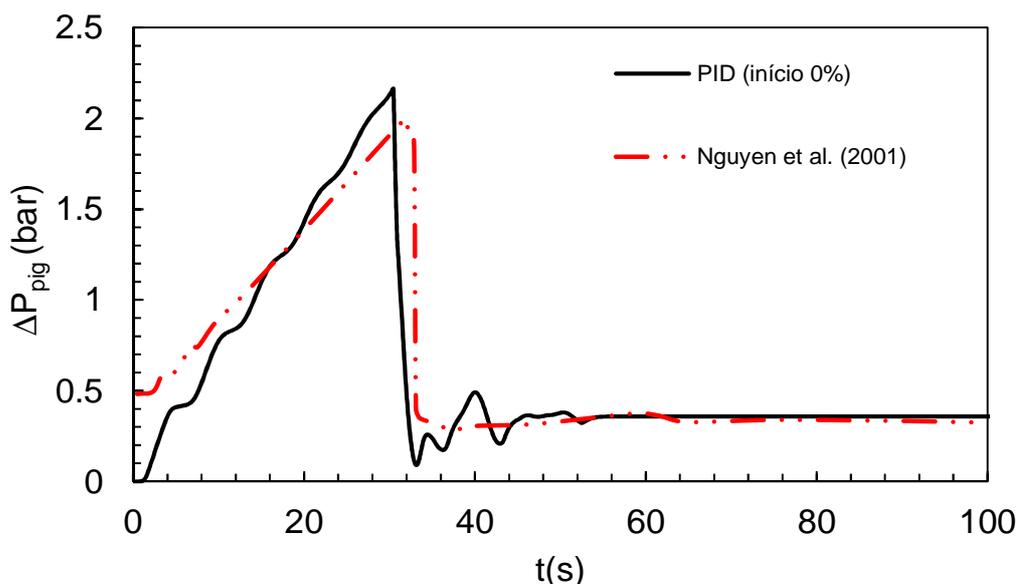


Figura 4.15 – Diferencial de pressão do PIG no desbloqueio. Nova rampa de pressão.

A Figura 4.16 apresenta uma comparação entre as velocidades de deslocamento do PIG de Nguyen *et al.* (2001) e com controle PID para a nova condição de contorno. Ambas as velocidades começaram a subir no mesmo instante de tempo, no entanto, como no caso anterior, alta velocidade de deslocamento do PIG continua sendo obtida, o que provavelmente é uma consequência do maior ΔP obtido no presente trabalho, correspondente ao início do deslocamento. Variações suaves da pressão na entrada, levaram a variações mais suaves da onda de pressão, eliminando a flutuação da pressão a montante do PIG antes do início do deslocamento

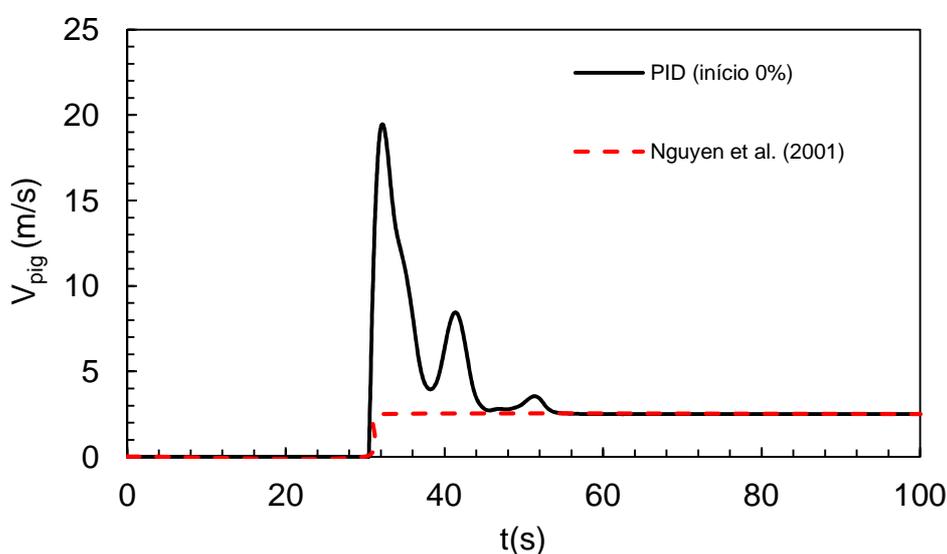


Figura 4.16 – Velocidade do PIG no desbloqueio. Nova rampa de pressão.

4.3. Caso 3: Caso Real – Aplicação do Modelo Numérico em Gasoduto

Após os casos comparativos terem sido bem-sucedidos, a metodologia de controle PID da velocidade do PIG, com uma válvula em seu corpo, foi aplicada na previsão do escoamento no gasoduto Candeias-Camaçari. Este duto foi escolhido em função das altas velocidades de escoamento, acima inclusive dos valores requeridos para passagem de PIG instrumentado. O objetivo é determinar o diâmetro adequado da válvula de *bypass* e identificar se a utilização de uma válvula de controle nesta aplicação consegue manter a velocidade do PIG estabilizada dentro de valores recomendados.

Neste caso são comparados dados de campo com dados de simulação do PIGSIM, na ausência de *bypass* e de controle, indicando a qualidade do modelo

hidrodinâmico acoplado ao modelo do PIG.

Inicialmente, um teste de sensibilidade é realizado para avaliar o diâmetro de *bypass* mais adequado para ser utilizado posteriormente no controle.

O gasoduto Candeias-Camaçari possui uma tubulação horizontal de comprimento $L=39,0$ km, diâmetro interno $D=0,3429$ m e espessura $e=6,35$ mm. Em relação ao material da tubulação, o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson iguais a $E= 2,0 \times 10^{11}$ Pa e $\mu=0,3$.

O fluido transportado é gás natural com constante de gás igual a $R= 518,30$ J/(kgK), sendo a viscosidade dinâmica igual a $\mu_f= 1,45 \times 10^{-5}$ m²/s e a compressibilidade $Z=0,9$. A condutividade térmica e calor específico a pressão constante foram definidos com $K= 0,1314$ W/(mK) e $c_p= 1814$ J/(kg K), respectivamente.

O gás entra na tubulação com pressão constante igual a $p_{int}=50$ kgf/cm² enquanto na saída a pressão é mantida constante em $p_{out}=25,7$ kgf/cm², valores para a condição de contorno do problema real.

Foi considerado a temperatura externa $T_{ext}=15^\circ\text{C}$ igual à temperatura do gás e o coeficiente global de transferência de calor $U_e = 5,0$ W/(m²K).

O PIG escolhido possui massa $m=270$ kg, desejando uma velocidade de deslocamento (*set-point*) de $V_{pig}=5$ m/s, recomendada para PIG instrumentado utilizado por Steinvoorte *et al.* (2016). A força de atrito estático e dinâmico são consideradas iguais e constantes $F_{at} = 18.412$ N, segundo Tolmasquim (2005), considera-se o coeficiente de vazão máximo na válvula $C_{Vmax}=1000\text{gpm.psi}^{-0,5}$, e o comportamento é igual percentagem. Considera-se desprezível o efeito de amortecimento neste caso.

Inicialmente, o escoamento no interior do duto encontra-se em regime permanente. Os casos simulados são referentes ao transiente de lançamento do PIG. A condição inicial do PIG referente a posição S_0 e a velocidade V_{p0} são nulas.

Para o controle PID, o ganho proporcional, o tempo integral e o tempo derivativo foram escolhidos como iguais a $K_p=12$, $\tau_i = 2,0$ s e $\tau_d = 0,5$ s, respectivamente. Diferente dos casos anteriores, optou-se por ativar o controle somente quando a velocidade do PIG ultrapassa a velocidade desejada ($V_{pig} > SP$).

A Figura 4.17 mostra o comportamento da velocidade do PIG ao longo da

tubulação para diferentes diâmetros de *bypass*. Uma comparação com dados de campo referente a velocidade média da passagem de PIG sem *bypass* é incluída no gráfico. Observa-se que o dado de campo é semelhante ao dado simulado sem *bypass*, sendo que a velocidade de campo é referente a uma média em cada trecho de duto com medição, o que explica o perfil reto por trechos. Além disso, é interessante observar que a velocidade do PIG diminui com o aumento do diâmetro de *bypass*, e que mesmo com $d_v=10$ cm a velocidade ultrapassa o valor desejável nos últimos quilômetros.

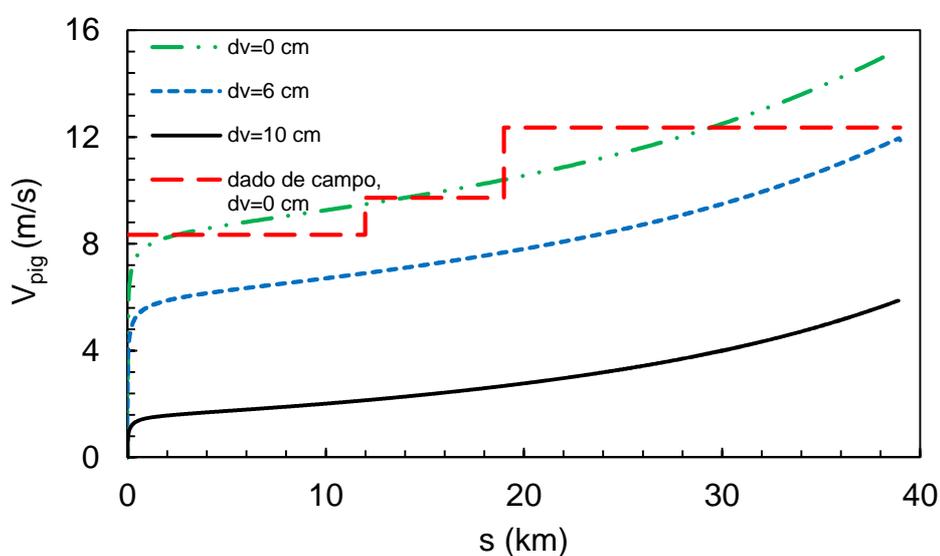


Figura 4.17 – Velocidade do PIG com *bypass* fixo. Caso 3

Quando o diâmetro é maior do que 10 cm, a pressão não é suficiente para ultrapassar a força estática e fazer o PIG se deslocar. Se a abertura da válvula for alterado ao longo do deslocamento do PIG, é possível manter a velocidade constante em 5 m/s ao longo do comprimento do duto. Deste modo, foi escolhido um diâmetro de 11 cm para diâmetro da válvula do *bypass* totalmente aberta e a operação foi iniciada com a válvula fechada.

A Figura 4.18 mostra o comportamento da velocidade do PIG e do percentual de abertura da válvula utilizando o controle PID. Observa-se que o controle se mostrou satisfatório e que a variação do percentual de abertura foi suave.

A Figura 4.19 apresenta a variação do perfil axial de pressão para diferentes instantes de tempo, indicando a posição ao longo do duto onde o PIG se encontra naquele instante. Observa-se claramente o diferencial de pressão através do PIG, e

o seu deslocamento ao longo da tubulação.

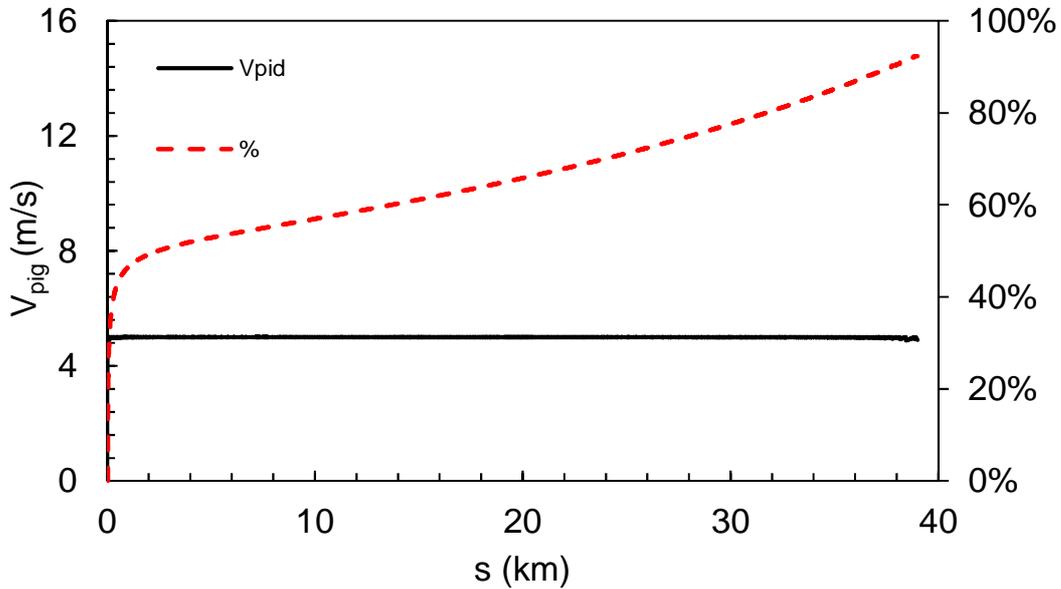


Figura 4.18–Velocidade do PIG e percentual de abertura com controle PID. Caso 3

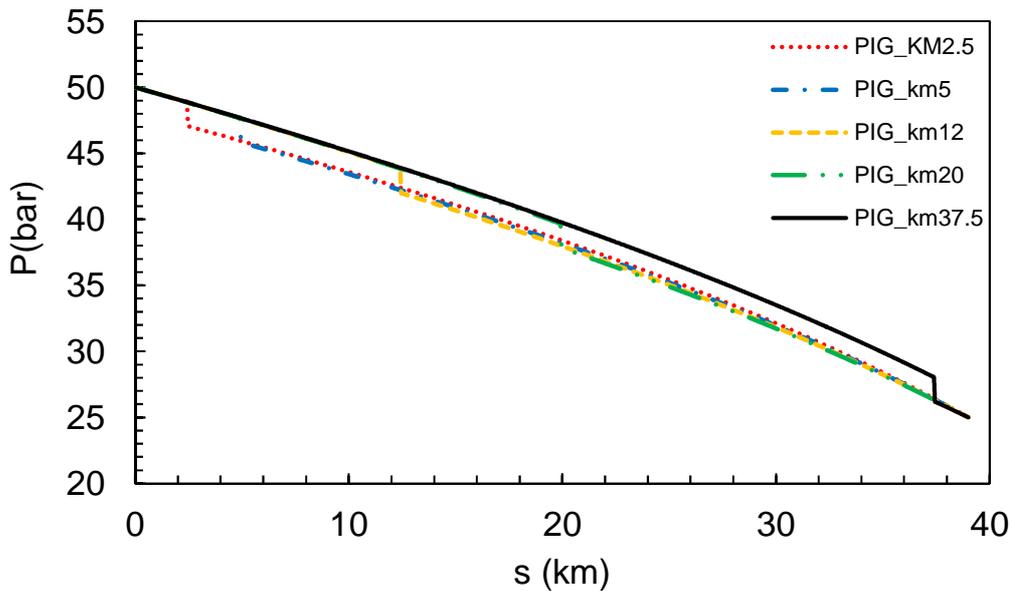


Figura 4.19 –Perfil de pressão. Caso 3

Este exemplo, mostra como a ferramenta numérica desenvolvida pode ser útil para indicar se é viável utilizar uma válvula de controle para que a passagem de PIG ocorra dentro dos limites do duto e dentro da velocidade recomendada. A ferramenta também auxilia na determinação do tamanho do diâmetro de *bypass*.

4.4. Caso 4: Escoamento Afogado

Este caso é utilizado para a realização de teste para análise do efeito do *choke*, i.e., obtenção de pressão crítica na válvula tornando o escoamento afogado. Quando isto ocorre, o fator de expansão Y se mantém constante, limitado em $Y=1-1,40/(3k)$. Para este teste, escolheu-se topografia descrita por um trecho horizontal e uma descida, a qual envolve desafios para o controle da velocidade do PIG.

O duto tem comprimento de $L=3,0$ km, diâmetro interno $D=0,46984$ m e espessura $e=9,53$ mm. Em relação ao material da tubulação, o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson foram definidos iguais a $E=2,1 \times 10^{11}$ Pa e $\mu=0,3$. A geometria é descrita na Figura 4.20.

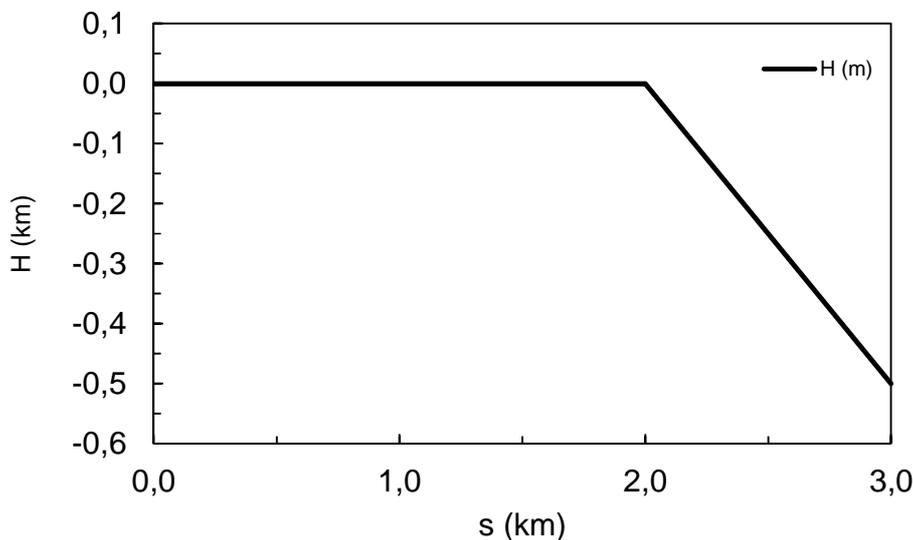


Figura 4.20 –Perfil altimétrico da tubulação. Caso 4.

O fluido transportado é gás natural com constante de gás igual a $R=518,30$ J/(kgK), sendo a viscosidade dinâmica igual a $\mu_f=1,45 \times 10^{-5}$ m²/s e a compressibilidade $Z=1,0$. A condutividade térmica e calor específico a pressão constante foram definidos com $K=0,1314$ W/(mK) e $c_p=1814$ J/(kg K), respectivamente. Neste caso, $c_v=c_p-R=1295,7$ J/(kgK) e $k=1,40$. Logo Y_{cri} correspondente a condição crítica é 0,67.

A condição de contorno do problema na entrada é pressão constante igual a $p_{int}=2,1$ kgf/cm² e na saída, a pressão também é mantida constante em $p_{out}=1,1$ kgf/cm².

O gás entra à temperatura $T_{in}=25^\circ\text{C}$ e se mantém constante. A temperatura do ambiente externo $T_{ext}=20^\circ\text{C}$. O coeficiente global de transferência de calor

externo ao longo da tubulação $U_e = 5,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

O PIG escolhido possui massa $m=27 \text{ kg}$, e deseja-se uma velocidade de deslocamento (*set-point*) de $V_{pig}=5 \text{ m/s}$ sendo o diâmetro máximo de *bypass* $d_v=20 \text{ cm}$. A força de atrito estático e dinâmico são consideradas iguais e constantes $F_{at} = 18\,412 \text{ N}$, tal como Tolmasquim (2004) e considera-se o coeficiente de vazão da válvula totalmente aberta $C_{Vmax}=1000 \text{ gpm}\cdot\text{psi}^{-0,5}$, e o comportamento dela é igual percentagem. Considera-se desprezível o efeito de amortecimento. Como condição inicial, considerou-se escoamento em regime permanente, sendo o PIG introduzido na tubulação na entrada ($S_0=0$) e com velocidade inicial V_{p0} nula.

Para o controle PID, o ganho proporcional, o tempo integral e o tempo derivativo foram escolhidos iguais a $K_p=1$, $\tau_i=1,0 \text{ s}$, $\tau_d=1,0 \times 10^{-2} \text{ s}$.

A Figura 4.21 apresenta o comportamento da velocidade do PIG V_{pig} e da fração de abertura da válvula α . Para iniciar o deslocamento do PIG, o nível de pressão subiu para vencer a força de atrito o que acelerou o PIG para uma velocidade acima do *SP*, ocasionando a abertura da válvula. Observa-se uma pequena oscilação no lançamento do PIG. Após este momento a velocidade se mantém constante e no início da descida, devido ao efeito gravitacional, o PIG é acelerado. Com o aumento da velocidade na descida, a válvula de controle oscila entre aumentando e diminuindo a abertura até conseguir manter a velocidade controlada no nível desejado, resultando em um percentual de abertura na válvula em outro patamar.

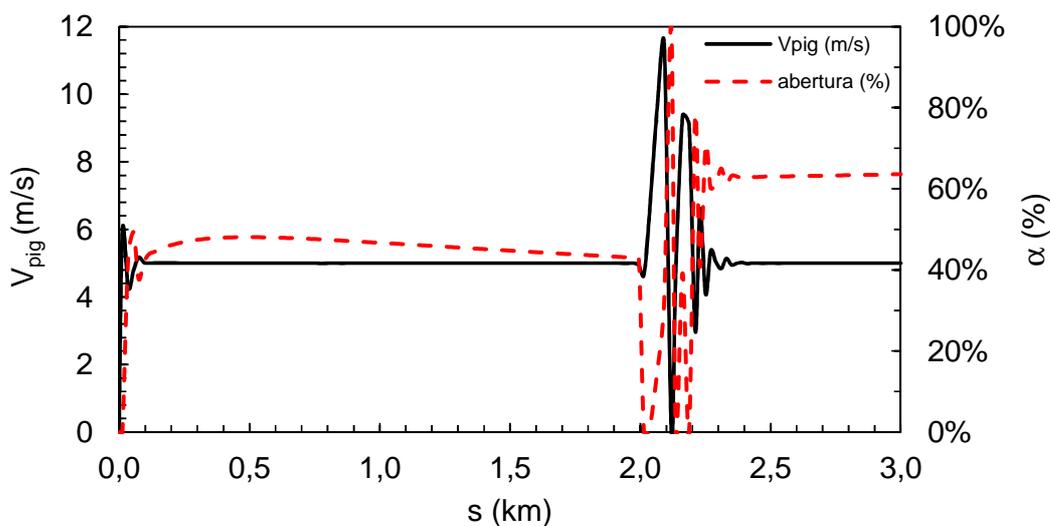


Figura 4.21 –Velocidade do PIG e abertura do *bypass* do PIG. Caso 4.

A Figura 4.22 mostra o diferencial de pressão no PIG ΔP_{pig} e o fator de expansão do gás Y . Observa-se que inicialmente o diferencial de pressão estava próximo a 1 bar e depois na descida ele estabilizou com 0,9 bar. Pode-se observar que assim que o PIG iniciou seu movimento, o fator de expansão subiu rapidamente, e o sistema atingiu escoamento afogado (pressão crítica na válvula) a partir do km 0,7 e se manteve até a descida, depois a pressão estabilizou num novo patamar acima da pressão crítica. Além disso, observa-se pelas Figuras 4.21 e 4.22 que no momento em que se atinge a condição de *choke* o percentual de abertura da válvula começa a cair.

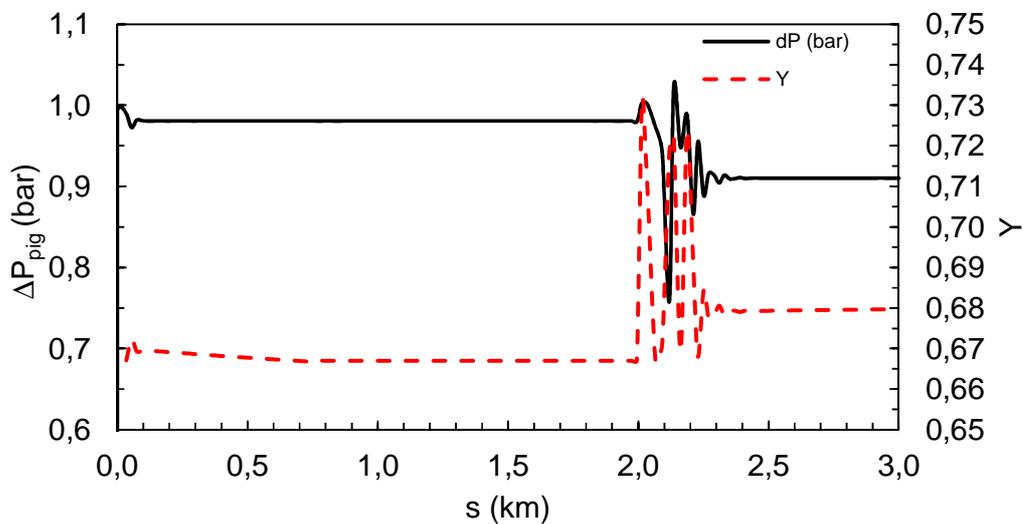


Figura 4.22–Diferencial de pressão no PIG e fator de expansão. Caso 4.

4.5. Caso 5: Teste de Sensibilidade

Este caso é utilizado para a realização de testes para análise de diversos parâmetros. Inicialmente, parâmetros do PIG propriamente dito são avaliados, como massa e força de contato. Posteriormente, são analisados os efeitos dos parâmetros da válvula de *bypass*. Por fim, os parâmetros do controle PID são investigados. Para este teste, escolheu-se um *riser* como geometria base em função da complexidade e dos desafios envolvidos para o controle da velocidade do PIG.

O *riser* tem comprimento $L=9,5$ km, diâmetro interno $D=0,4889$ m e espessura $e=9,53$ mm. Em relação ao material da tubulação, o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson foram definidos iguais a $E= 2,0 \times 10^{11}$ Pa e

$\mu=0,3$. A geometria é descrita na Figura 4.23.

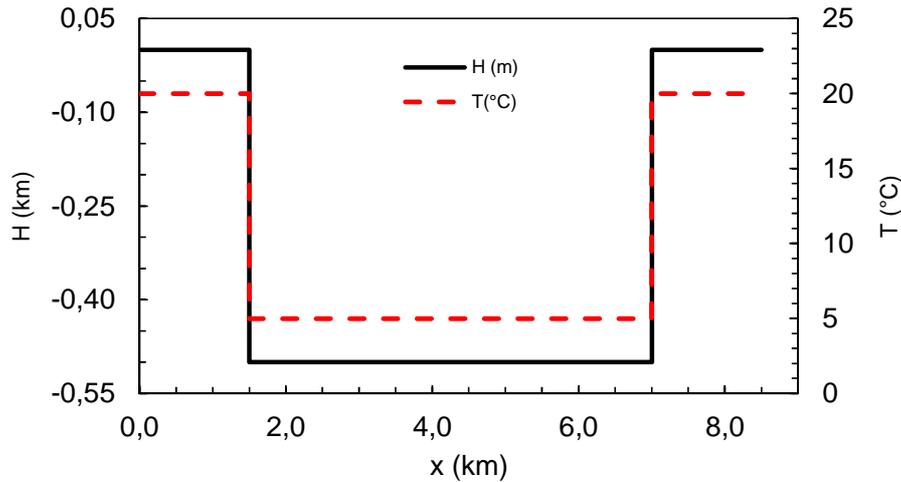


Figura 4.23 –Perfil altimétrico e de temperatura ao longo da tubulação. Caso 5.

O fluido transportado é gás natural com constante de gás igual a $R= 518,30$ J/(kgK), sendo a viscosidade dinâmica igual a $\mu_f= 1,45 \times 10^{-5}$ m²/s e a compressibilidade $Z=1,0$. A condutividade térmica e calor específico a pressão constante foram definidos com $K= 0,1314$ W/(mK) e $c_p= 1900$ J/(kg K), respectivamente.

A condição de contorno do problema na entrada é pressão constante igual a $p_{int}=15$ kgf/cm² e na saída, a pressão também é mantida constante em $p_{out}=12,5$ kgf/cm².

O gás entra à temperatura $T_{in}=60^{\circ}\text{C}$ e se mantém constante. A temperatura do ambiente marinho externo varia entre 20°C e 5°C dependendo da profundidade atingida, como mostra a Figura 4.23. O coeficiente global de transferência de calor externo na região horizontal é $U_e = 0,832$ W/(m² K) e na região vertical, devido às correntes marinhas é $U_e = 20,6$ W/(m² K).

O PIG escolhido possui massa $m=74$ kg, e deseja-se uma velocidade de deslocamento de $V_{pig}=3$ m/s, usualmente recomendada para o PIG instrumentado, sendo o diâmetro máximo de *bypass* $d_v=10$ cm. No caso base, a força de atrito estático e dinâmico são consideradas iguais e constantes $F_{at} = 34.400$ N, seguindo Tolmasquim (2004) e considera-se o coeficiente de vazão da válvula totalmente aberta $C_{Vmax}=1000$ gpm.psi^{-0,5}, com comportamento igual percentagem. Considera-se desprezível o efeito de amortecimento.

Para o controle PID, o ganho proporcional, o tempo integral, o tempo

derivativo e o *set-point* foram definidos como iguais a $K_p = 1$, $\tau_i = 4,0$ s, $\tau_d = 0$ s e $SP = 3,0$ m/s, respectivamente para o caso base. Neste caso um controle PI é suficiente.

Inicialmente, o escoamento no interior do duto encontra-se em regime permanente. A condição inicial do PIG referente a posição S_0 e a velocidade V_{p0} são nulas.

O comportamento da velocidade e do percentual de abertura do *bypass* é descrito na Figura 4.24.

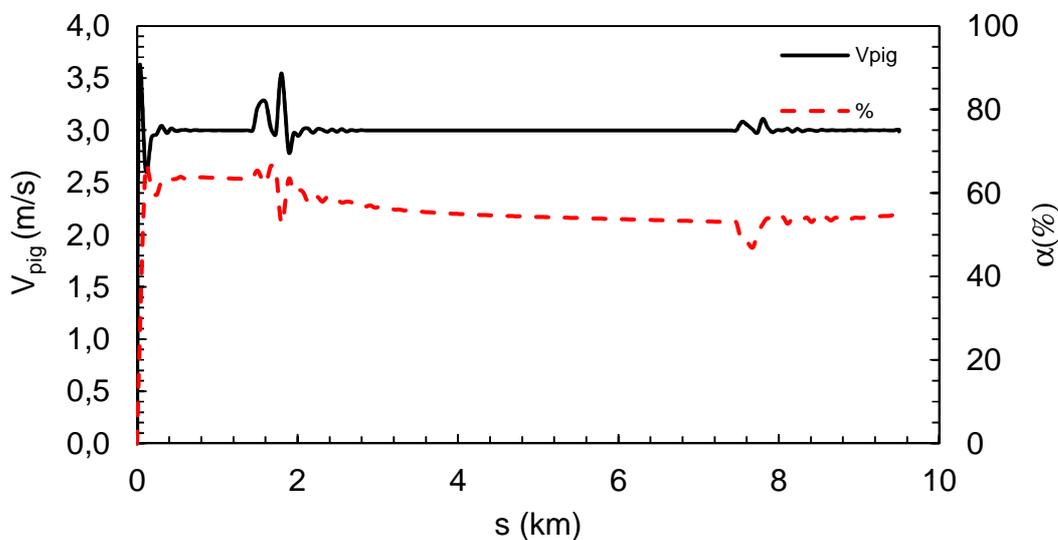


Figura 4.24 – Velocidade do PIG e percentual de abertura no *bypass*, caso base. Caso 5.

4.5.1. Caso 5.1: Influência da Massa do PIG

Para avaliar a influência da massa do PIG, considerou-se três casos: caso base, PIG com massa $m=74$ kg; um PIG mais leve, $m=37$ kg e um mais pesado $m=148$ kg. Todos os outros parâmetros foram iguais aos do caso base.

A massa do PIG influencia na velocidade do PIG nos momentos de subida e descida, ou seja, quando a massa é maior os transientes são maiores. A Figura 4.25 mostra que as velocidades durante a parte horizontal e vertical se mantiveram iguais, porém no início da subida e no início da descida ocorreu uma oscilação maior para o PIG mais pesado.

O percentual de abertura da válvula de *bypass* para todos os casos se comportou de maneira semelhante ao caso base, descrito na Figura 4.24, inicialmente ficou em 63% no primeiro trecho horizontal e atinge a 55% no segundo

trecho. A única diferença é o início da descida e o início da subida, quanto maior a massa, maior o transiente da válvula.

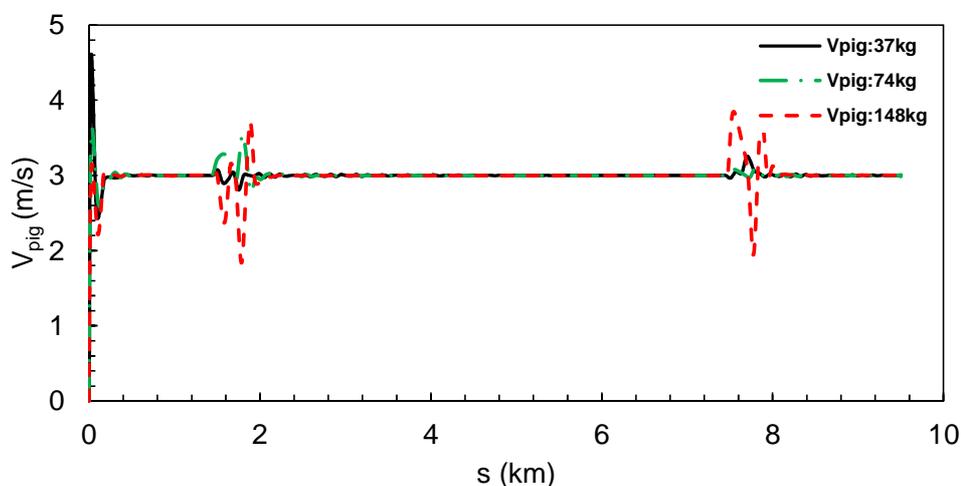


Figura 4.25 –Influência da massa na velocidade do PIG. Caso 5.

4.5.2. Caso 5.2: Influência da Força de Contato no PIG

Nesta secção é apresentada a influência das forças de atrito no PIG, i.e., parâmetros referentes a força de atrito estática, força de atrito dinâmico e ao coeficiente de amortecimento são discutidos e analisados.

A força de atrito estática influencia somente para vencer a inércia do PIG quando ele está com $V_{pig}=0$, após o PIG iniciar o movimento, a força para manter o PIG se deslocando é menor. Um exemplo de reinício do movimento do PIG após interrupção do deslocamento é apresentado na secção 4.2.2. Em função disto, analisa-se somente o efeito da força dinâmica, mantendo a força estática com o valor do caso base.

É importante mencionar, que só é possível utilizar um controle com sucesso, se a velocidade de deslocamento do PIG com a válvula totalmente aberta for inferior ao valor desejado de deslocamento do PIG.

A Figura 4.26 compara a velocidade de deslocamento do PIG do caso base com controle PID e sem controle, com a válvula fechada. O caso base, sem controle, com a válvula totalmente aberta, não se desloca ao longo da tubulação, sendo sua velocidade com a válvula totalmente fechada aproximadamente igual a 6 m/s. Neste caso, é possível controlar a velocidade de deslocamento do PIG com a válvula selecionada, conforme pode ser visto. Na mesma figura, apresenta-se a velocidade

do PIG com uma força de atrito dinâmico menor, $Fat_2=24\ 400\text{N}$. Investiga-se a velocidade de deslocamento, considerando a válvula totalmente aberta e totalmente fechada, sem controle. Como esperado, observa-se que quanto menor a força de atrito dinâmico, maior a velocidade de deslocamento. Note que com a força de atrito menor e com a válvula totalmente aberta o PIG se desloca acima do *set-point*, no início do processo, indicando que a válvula de controle selecionada não será efetiva neste caso, sendo efetiva somente após o km 2.

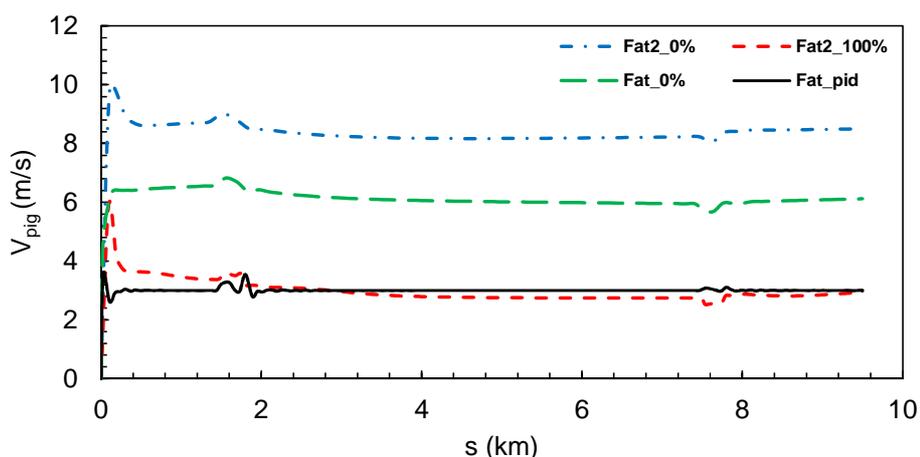


Figura 4.26 –Influência da força de atrito dinâmica na velocidade do PIG. Caso 5.

O coeficiente de amortecimento no PIG tem por objetivo inserir um aumento na força de atrito, a qual é proporcional à velocidade de deslocamento. Para este teste, manteve-se o controle PID ligado com os parâmetros do caso base, variando-se somente o coeficiente de amortecimento C .

Se o PIG se desloca com velocidade constante, a contribuição adicional do termo de amortecimento à força de atrito será constante. Considerando que o coeficiente de amortecimento é sempre positivo, seu efeito será sempre aumentar a resistência ao movimento do PIG, atuando no sentido de reduzir a velocidade do PIG.

A Figura 4.27 mostra três casos, um sem amortecimento e dois com amortecimento, apresentando o comportamento da velocidade de deslocamento do PIG em relação a cada um dos cenários. Observa-se que com $C=10\ 000\ \text{N s/m}$ o amortecimento é tão grande que o controle fecha totalmente o *bypass* e mesmo assim a velocidade desejada não é atingida. Além disso, observa-se que no final da descida ($\sim\ \text{km } 2$), o caso com $C=1000\ \text{N s/m}$, reduz a intensidade da oscilação comparando com o caso base sem amortecimento. Isto ocorre, pois quando a

velocidade começa a subir, a resistência ao movimento também cresce, desacelerando o PIG.

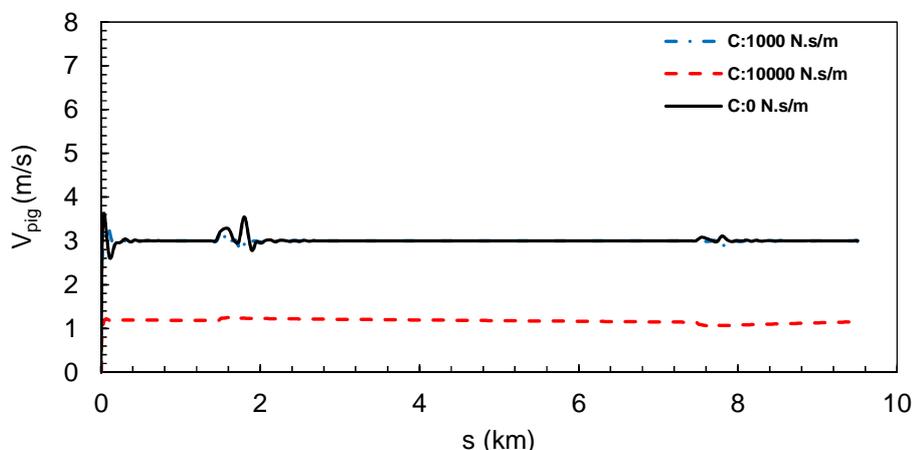


Figura 4.27 –Influência do amortecimento na velocidade do PIG. Caso 5.

4.5.3. Caso 5.3: Influência dos Parâmetros da Válvula

A válvula de *bypass* é definida em função do diâmetro do furo, a função de abertura da válvula (proporcional ou percentual ao C_v) e o coeficiente de descarga (ou coeficiente de vazão). Nos testes realizados aqui, manteve-se a função de abertura do tipo igual percentagem, como no caso base.

Em relação ao diâmetro do furo, foi realizado um teste na Seção 4.3 para três diâmetros diferentes e por isto um novo teste não é realizado nesta seção. A respeito da variação do diâmetro do *bypass* no PIG, observa-se que um aumento em d_v provoca uma redução na velocidade de deslocamento do PIG, porém a relação entre V_{pig} e d_v não é linear e existe um diâmetro limite no qual o PIG não consegue vencer a inércia. Este comportamento é apresentado na Figura 4.17.

O coeficiente de vazão é um parâmetro relacionado à perda de carga localizada na válvula, ele varia em função do tipo da válvula e do diâmetro, maiores detalhes na seção 2.6. Neste caso, fixou-se o diâmetro do *bypass* $d_v=10\text{cm}$, correspondente ao caso base. Selecionou um caso com C_v maior que o C_v do caso base e um C_v menor.

A Figura 4.28 mostra o efeito do coeficiente de vazão C_v na velocidade de deslocamento do PIG e a Figura 4.29 na fração de abertura da área do *bypass*.

Apresenta-se na Figura 4.28, a velocidade do PIG para os três coeficientes de descarga, considerando a válvula totalmente aberta e com controle.

Primeiramente observa-se que quanto maior o C_v , menor a velocidade do PIG, considerando a válvula de *bypass* 100% aberta, sem controle. Neste caso, com o C_v mais elevado, sem controle, o PIG não se desloca na tubulação. Nos outros dois casos, o PIG para na região inicial da tubulação. Testou-se utilizando um C_v bem baixo ($C_v=100 \text{ gpm.psi}^{-0,5}$) e o PIG consegue se deslocar até o final da tubulação.

Em relação aos casos com controle, observa-se na Figura 4.28 uma oscilação da velocidade no início da partida para os três casos, o que está relacionado com o aumento de pressão para vencer o atrito estático. O caso com C_v maior que o do caso base consegue controlar bem a velocidade do PIG, de forma equivalente ao caso base. No entanto, para o caso com menor C_v , a velocidade no final da descida é muito elevada, sendo mais difícil de controlar, apresentando uma oscilação bem maior que a obtida nos outros casos. Mas a partir do km 3, o controle também se tornou efetivo, controlando a velocidade no PIG no patamar desejado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312454/CA

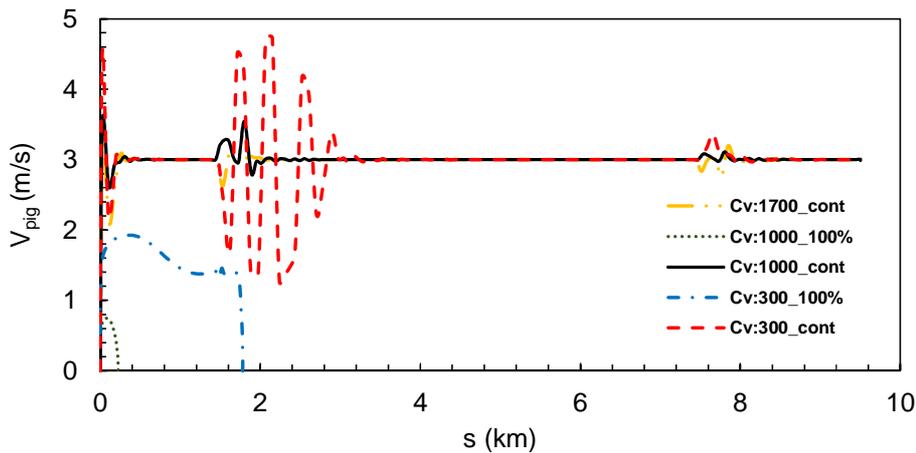


Figura 4.28 – Influência do C_v na velocidade do PIG. Caso 5

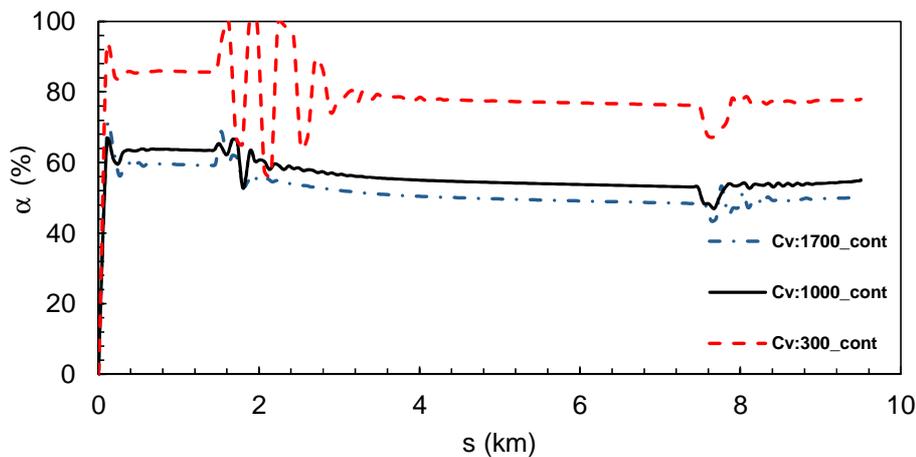


Figura 4.29 – Influência do C_v no percentual de abertura da válvula. Caso 5

O comportamento do coeficiente de vazão C_v no percentual de abertura do *bypass* do PIG pode ser analisado na Figura 4.29. Primeiramente observa-se quanto maior o C_v , menor o percentual de abertura da válvula para manter o PIG se deslocando com a velocidade desejada, além disso as oscilações são maiores para menores C_v , como já mencionado, devido às altas velocidades, tornando a resposta do controle menos eficiente.

4.5.4. Caso 5.4: Teste dos Parâmetros do Controle PID

Nesta secção é apresentada a influência dos parâmetros de controle e a importância de um ajuste adequado. Realizou-se um teste de sensibilidade referente ao ganho proporcional K_p , ao tempo integral τ_i e ao tempo derivativo τ_d .

A Figura 4.30 mostra a influência do termo integral no controle da velocidade do PIG. Observa-se que tanto o aumento quanto a redução do tempo integral do controle, uma oscilação é induzida entre abertura plena e fechamento total da válvula, não sendo possível manter a velocidade controlada. Este comportamento é explicado pois quando o tempo integral é grande, o controle leva um tempo maior para atuar e, como consequência, o PIG fica desgovernado e acaba oscilando rápido, pois a influência da integral do erro fica menor. Quando o tempo integral é pequeno, o oposto ocorre, a atuação do controle rápida, não esperando o suficiente para uma resposta do sistema, resultando em oscilações. Notou-se no entanto, que as oscilações foram mais suaves que no caso de tempo integral grande.

A simulação com o tempo integral $\tau_i=6$ s causou interrupção da simulação, em função das excessivas oscilações.

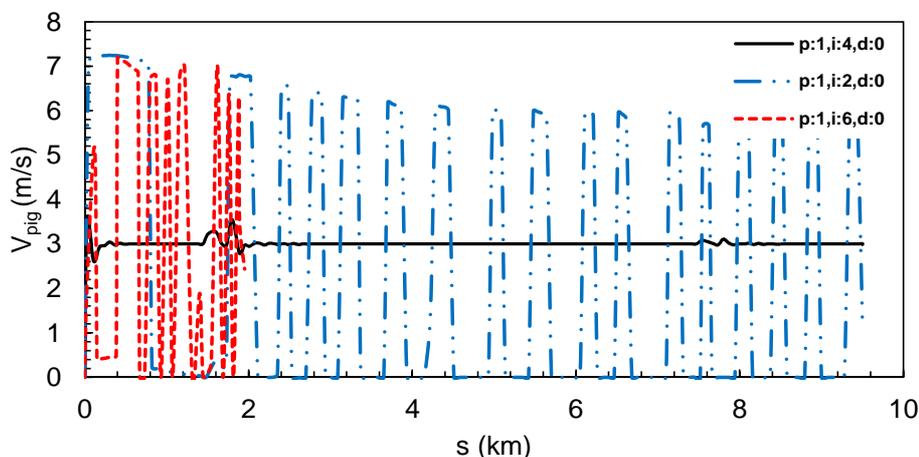


Figura 4.30 –Influência do tempo integral na velocidade do PIG. Caso 5.

A Figura 4.31 mostra a influência do ganho do controlador. Observa-se que o aumento do ganho proporcional provoca uma oscilação excessiva e neste caso fez o PIG parar. Uma redução no ganho proporcional manteve a velocidade controlada. Observe que uma pequena oscilação no início da descida e outra no início da subida, o que ocorre tanto para $K_p=1$ e $K_p=0,5$, ou seja, neste caso ambos os parâmetros realizam o controle satisfatoriamente.

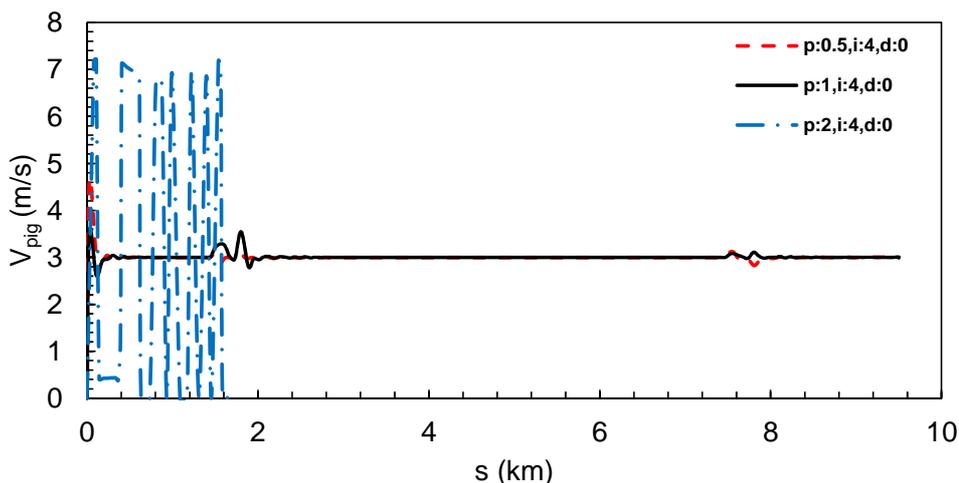


Figura 4.31–Influência do ganho proporcional na velocidade do PIG. Caso 5.

A influência do tempo derivativo do controlador é ilustrada na Figura 4.32. Observa-se que um pequeno aumento no tempo derivativo resulta em uma grande oscilação da velocidade do PIG, com um aumento significativo, a resposta do controle causa excessiva oscilação, induzindo a interrupção da simulação, conforme ilustrado para $\tau_d=1s$.

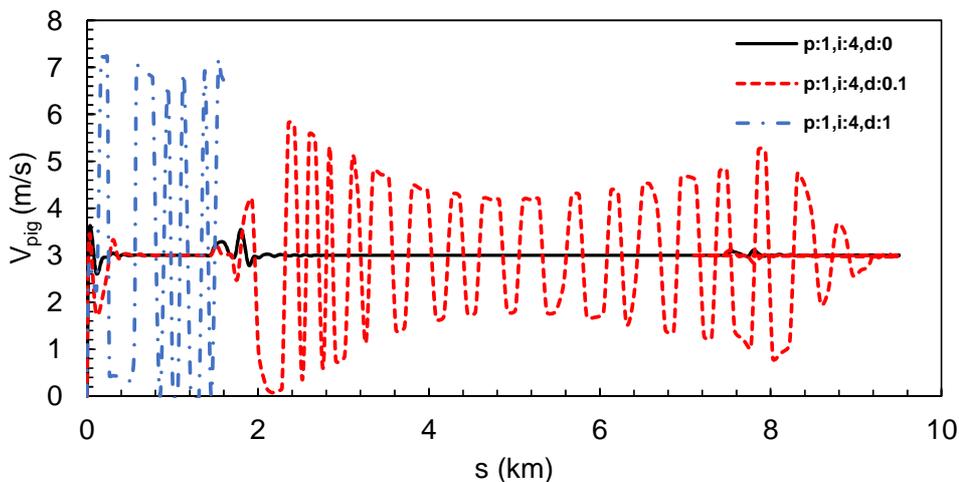


Figura 4.32 –Influência do tempo derivativo na velocidade do PIG. Caso 5.

Para a análise destes dados, é importante rever a expressão 2.50, referente a expressão do controle PID, já que as justificativas tendem a ser explicadas através desta expressão.

Após esta série de testes, observou-se que é interessante que o tempo derivativo não seja ativado no processo de controle da velocidade do PIG, uma vez que o sistema é muito sensível a pequenas variações deste parâmetro. Ocasionalmente, o tempo derivativo pode ser útil para reduzir picos muito elevados de velocidade. O tempo integral deve ser o suficiente para manter a velocidade controlada, se ele for grande o ganho proporcional predomina e faz com que o SP vá para os extremos e se o tempo for pequeno o ganho proporcional perde efeito fazendo com que o controle fique oscilando rapidamente. A sensibilidade do controle é muito grande com relação aos três parâmetros. Para as situações investigadas, em função da variável de processo não ficar variando com intensidade, optou-se por um $\tau_d=0$ s , além disso, em função das respostas lentas no geral, optou-se por um termo integral maior do que o ganho proporcional, pois neste caso a resposta possui um erro pequeno, deste modo escolheu-se $\tau_i=4$ s e $K_p=1$.