

## CONTROLE AUTOMÁTICO APLICADO A ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS ATRAVÉS DE TUBULAÇÕES: UMA CONTRIBUIÇÃO BASEADA NA LITERATURA

Breno Peres Guimarães Félix, brenofelixifsp@gmail.com<sup>1</sup>  
Emerson dos Reis, emersonr@ifsp.edu.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP, campus of São João da Boa Vista, Acesso Dr. João Batista Merlin, S/N – Jd. Itália, São João da Boa Vista/SP, CEP.13872-551.

**Resumo.** Este trabalho aborda, a partir da literatura, o controle automático aplicado aos escoamentos multifásicos através de tubulações, os quais podem conter líquidos imiscíveis, gases e/ou sólidos particulados. Basicamente, um sistema de controle automático é constituído de três blocos: o sensor, o controlador e o atuador. O bloco sensor se constitui de um ou mais instrumentos de medição, cujos sinais gerados são analisados a fim de se identificar o padrão de escoamento e determinar o valor das grandezas de interesse. Para este fim, técnicas de análise de sinais baseadas na Estatística, nas transformadas de Fourier, de Gabor ou de Hilbert Huang ou na Teoria do Caos, dentre outras dependendo das características do sistema, e algoritmos de controle baseados em redes neurais artificiais, lógica Fuzzy e outros podem ser utilizados no bloco do controlador. No atuador, o qual pode operar diretamente sobre as linhas multifásicas ou mesmo sobre as linhas monofásicas associadas, existem as válvulas, os inversores de frequência conjugados aos motores elétricos e as bombas hidráulicas. Devido aos diferentes tipos e à complexidade inerente aos escoamentos multifásicos há, dentre as possíveis combinações e estratégias, a possibilidade de uma variedade de sistemas de controle, sendo que a escolha da melhor estratégia deverá levar em consideração fatores como: as particularidades dos materiais a ser transportados, as grandezas de medição ou de sensoriamento e consequentemente as características dos sinais gerados, as condições de operação com destaque para os padrões de escoamento, o tempo de resposta necessário, além da precisão desejada e do custo.

**Palavras-chave:** controle automático, escoamentos multifásicos, processos industriais.

### 1. INTRODUÇÃO

Tubulações são amplamente utilizadas nas indústrias para transporte de materiais que possam escoar sejam eles líquidos, gasosos, pastosos ou sólidos em suspensão. Estes materiais compõem, muitas vezes, os chamados escoamentos multifásicos os quais ocorrem na presença de duas ou mais fases como gás-líquido, gás-sólido ou mesmo gás-líquido-sólido, sendo incluídos, nesta categoria, também os escoamentos de líquidos imiscíveis como o água-óleo. Sua principal característica é a ocorrência dos chamados padrões ou regimes de escoamento, os quais têm relação com o arranjo espacial das fases (Chisholm, 1983). Eles são comumente encontrados nas indústrias químicas, de energia, de alimentos e de petróleo (Heywood e Cheng, 1984), sendo que o monitoramento e o controle de parâmetros associados a esses escoamentos determinam a eficiência de muitos processos industriais (Yan e Mylvaganam, 2012).

Há muitos casos em que sistemas de controle automático podem melhorar a eficiência e segurança em processos industriais, em especial no transporte por meio de escoamentos multifásicos através de tubulações. Alguns exemplos são os seguintes: (i) quando há a formação de pistões de líquido no escoamento, chamado pistonado ou em golfadas que, em meio a duas bolhas alongadas, ocorrem colisões intermitentes de massas de líquido nos componentes da linha, causando a diminuição da vida útil desses instrumentos além de vibrações nas tubulações e estruturas (Sausen e Sausen, 2012); (ii) quando há possibilidade de inundação em separadores devido ao nível alto de líquido (Ruscheinsky, 2011); (iii) quando há elevada perda de carga através da tubulação, ocasionando prejuízo econômico já que, quanto maior a perda de carga maior será o consumo de energia necessário no processo de transporte (Pacheco, 2007; Barbosa, 2004); (iv) quando há o arraste de água em tubulações de vapor, o qual acontece na forma de gotas ou mesmo pequenas golfadas de água no vapor,

provocando a redução da eficiência do processo de transporte de energia térmica e mesmo avarias nas paletas e até a destruição total de turbinas a vapor no caso de geração de energia (Costa Carosio, 2009). Destaca-se também a ocorrência de anomalias como vazamentos, os quais podem ser uma consequência do controle inadequado, implicando em perdas na produção, danos ambientais e até mesmo acidentes (Zhang, 1996).

O estudo de técnicas para monitoramento e controle de escoamentos multifásicos é uma área em franco desenvolvimento. Ela visa reduzir custos, energia consumida, a periodicidade das manutenções e a ocorrência de acidentes melhorando a eficiência do sistema. Dado o exposto se estabelece o objetivo desse trabalho: apresentar uma visão sobre controle automático de processos que se envolvam com o transporte por escoamentos multifásicos de materiais através de tubulações.

## 2. PROCESSOS INDUSTRIAIS E ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS

Os escoamentos multifásicos podem ocorrer em tubulações horizontais, inclinadas ou verticais. Eles podem ser ascendentes ou descendentes, ou mesmo ocorrer no interior de equipamentos. O escoamento bifásico é o mais comum na indústria, para o qual existem quatro tipos com base nas fases que o compõe: líquido-sólido, líquido-líquido, gás-líquido e gás-sólido (Crowe, 2005).

O escoamento líquido-sólido é comumente encontrado em processos químicos. Em geral constitui-se de água utilizada para transportar materiais como gesso, cascalho, cimento, argamassa, minério de ferro, calcário e argila, muitas vezes a longas distâncias. O escoamento líquido-líquido pode ser encontrado na indústria de petróleo pela presença de emulsões de água em óleo (ou vice-versa), onde também é comum se encontrar o escoamento gás-líquido como ar-água e gás-óleo. Nos casos mais complexos há o escoamento quadrifásico de gás-líquido-líquido-sólido, como no caso de gás, água, óleo e areia de um poço de petróleo (Heywood e Cheng, 1984).

O escoamento gás-sólido em tubulações é encontrado em diversas industriais, com destaque para o transporte pneumático de materiais. Neste caso, uma das fases constitui-se de ar e a outra do material particulado sendo transportado. Exemplos desses materiais são: óxido de alumínio, alimentos granulados, argila, barita, bauxita, bórax, carbonato de cálcio, cloreto de cálcio, negro de fumo, cimento, café (cru, torrado, moído), detergente, feldspato, carvão, farinha, cinza, fluorita, areia, mistura para vidro, caco de vidro, gesso, óxido de ferro, caulim, cianita, calcário magnésio, leite em pó, amendoim, resina de PVC, sal, sílica, barrilha, sulfato de sódio, metal, enxofre, açúcar, dióxido de titânio e muito mais (Heywood e Cheng, 1984).

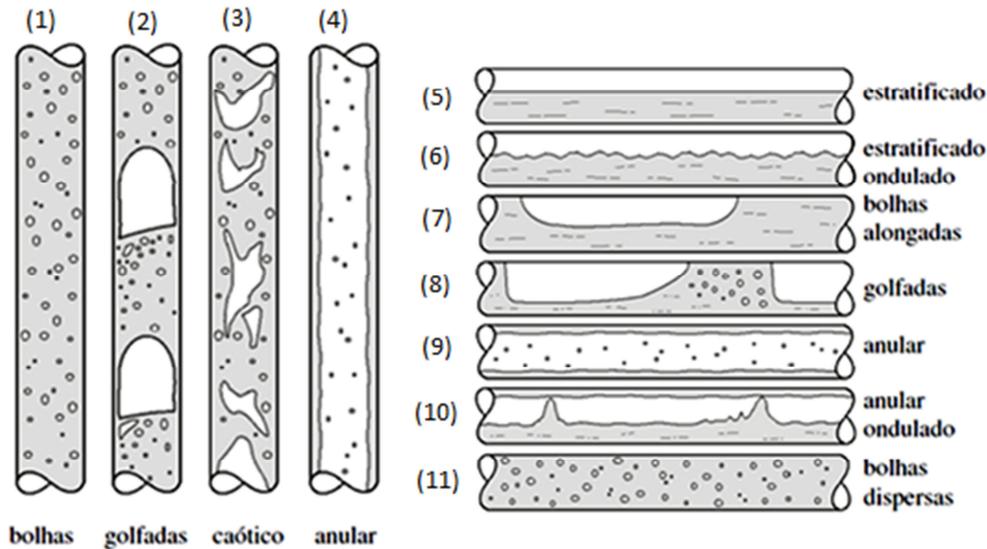
A principal característica dos escoamentos multifásicos é a formação dos padrões ou regimes, os quais têm relação com o arranjo espacial das fases no interior da tubulação e ao longo do tempo (Paladino, 2001). Portanto, para cada padrão de escoamento se tem uma configuração espacial das fases a qual depende da velocidade ou vazão de cada fase, do diâmetro da tubulação, das propriedades das fases, da rugosidade do tubo e da orientação da tubulação seja inclinada, vertical ou horizontal. Neste ponto, destaca-se que é de suma importância a identificação dos padrões de escoamento para efetivo controle e monitoramento.

Nos parágrafos a seguir se apresenta algumas informações sobre os padrões de alguns escoamentos bifásicos horizontais e verticais ascendentes.

Segundo Crowe (2005), no caso do escoamento gás-líquido em tubulações verticais se pode identificar cinco padrões distintos, os quais são representados do lado esquerdo da Fig. 1. Da esquerda para a direita se considera uma vazão fixa de líquido enquanto que a vazão de gás foi aumentada entre os diferentes padrões. No padrão em bolhas (1), a fase gasosa se encontra distribuída em pequenas bolhas ao longo da fase contínua líquida. O padrão em golfadas (2) apresenta comprimento das bolhas alongadas de 10 a 50 vezes o diâmetro do duto, sendo que a parte superior da bolha possui forma esférica e o gás é separado da parede do duto por um fino filme de líquido descendente, têm-se pequenos pacotes de líquido, chamados de pistões, que são intercalados por estas bolhas. O padrão caótico (3), também chamado de agitante, ocorre quando as bolhas se quebram frequentemente gerando um escoamento caótico no centro do tubo. No padrão anular (4), o líquido escoo junto às paredes formando um filme fino enquanto a massa de gás escoo pelo centro do duto carregando gotículas de líquido.

Por sua vez, os escoamentos em dutos horizontais são mais complexos devido à assimetria causada pela ação da gravidade. As bolhas ou as fases menos densas tendem a escoar pela metade superior do tubo como mostrado do lado direito da Fig. 1 onde, de cima para baixo, considera-se que, partindo-se de uma vazão baixa de gás e de líquido em (5), a vazão de gás foi aumentada até (6), depois a de líquido foi aumentada até (8), novamente a de gás foi aumentada até (9) onde o escoamento ocorre em alta velocidade, depois a de líquido foi aumentada e a de gás reduzida em (10) e, finalmente, a de gás foi novamente reduzida em (11). De acordo com Crowe (2005), os padrões de escoamento gás-líquido em tubos horizontais são: estratificado (5) onde o gás escoo na parte superior do tubo enquanto na parte inferior escoo o líquido, o qual é caracterizado pela baixa velocidade das duas fases; quando a velocidade superficial da fase gasosa é aumentada, formam-se ondas na interface líquido-gás levando à formação de outro padrão, chamado de estratificado ondulado (6); bolhas alongadas (7) é um padrão no qual, quando a velocidade do gás é aumentada a partir do padrão em bolhas, as bolhas pequenas se colapsam formando bolhas alongadas que escoam no topo da seção pela ação da gravidade; no padrão em golfadas (8), as bolhas alongadas são maiores do que no padrão (7) e ocupam uma região maior da seção do tubo com um filme

de líquido escoando pela região inferior, as quais são intercaladas por pistões de líquido com pequenas bolhas dispersas; o escoamento anular (9), em tubos horizontais, é semelhante ao vertical (4); o padrão anular ondulado (10) ocorre com a redução da vazão do gás provocando o acúmulo de líquido na parte inferior da tubulação e a formação de ondas pronunciadas, já na superfície superior observa-se uma fina camada de líquido junto à parede com o gás ainda em alta velocidade na região central; por último se tem o padrão em bolhas dispersas (11) similar ao padrão (1) para tubos verticais, o qual ocorre reduzindo-se ainda mais a vazão de gás (Crowe, 2005).



**Figura 1. Padrões de escoamento líquidos gás em dutos verticais e horizontais. Adaptado de Huallpachoco (2011).**

De forma geral, os padrões de escoamento gás-sólido são categorizados como em fase densa ou em fase diluída. No padrão em fase densa, os sólidos são transportados sem que estejam completamente suspensos no meio gasoso, enquanto que, no padrão em fase diluída, os sólidos estão parcialmente ou completamente misturados ao gás. De forma específica, a Fig. 2 apresenta os padrões de escoamento gás-sólido em tubos horizontais onde, de (1) para (2), considera-se que a vazão de gás foi reduzida enquanto que a de sólidos foi aumentada. No padrão homogêneo (1), a velocidade do gás é suficientemente alta para manter todas as partículas suspensas. Na medida em que a velocidade do gás é reduzida, o escoamento deixa de ser totalmente homogêneo gerando o padrão homogêneo degenerado (2), onde as partículas ainda continuam dispersas no meio gasoso. Na literatura, os padrões 1 e 2 são comumente classificados como em fase diluída enquanto os demais são em fase densa. Diminuindo ainda mais a vazão de gás, as partículas sólidas deixam de permanecer suspensas resultando na formação de uma camada de sólidos na parte inferior da tubulação, dando início à formação de dunas, chamado de dunas imaturo (3) até a sua formação completa no padrão em dunas (4) e a sua degeneração em (5). No padrão em golfadas imaturo (6), inicia-se a formação do padrão pistões de sólidos que preenchem toda a seção transversal, estando totalmente formado o escoamento em golfadas em (7). O escoamento de sólidos deverá cessar antes de atingir os padrões (9) e (10) (Crowe, 2005).

Na Fig. 3 são mostrados os padrões de escoamento horizontal para os escoamentos líquido-sólido à esquerda (Bratland, 2013) e líquido-líquido a direita (Arirachakaran *et al.*, 1989), ambos em tubulações horizontais.

Do lado esquerdo da Fig. 3 se têm quatro diferentes padrões: o padrão homogêneo (1) é obtido quando as partículas sólidas estão uniformemente distribuídas na fase líquida; quando as partículas sólidas não estão mais igualmente distribuídas, tem-se o padrão heterogêneo (2); na condição em que boa parte das partículas move-se junto à parede inferior do tubo, se tem o padrão estratificado (3); por último quando algumas partículas não mais se movem, se tem o padrão de leito estacionário (4).

Por sua vez, o escoamento horizontal líquido-líquido de baixa viscosidade, á direita da Fig. 3, apresenta cinco padrões diferentes. Inicialmente tem-se o padrão estratificado (1) no qual se tem dois líquidos imiscíveis com alguma mistura na interface e formação de gotas na região de interface; no padrão misturado (2), tem-se o fluido completamente disperso no outro como, por exemplo, água totalmente dispersa sobre o óleo; no padrão anular (3), uma fase escoo na região central do tubo; o padrão intermitente (4) se caracteriza pela passagem alternada de porções de líquido homogêneo ou com gotas dispersas ocupando toda seção do tubo; no padrão disperso (5), observa-se uma mistura homogênea entre as fases.

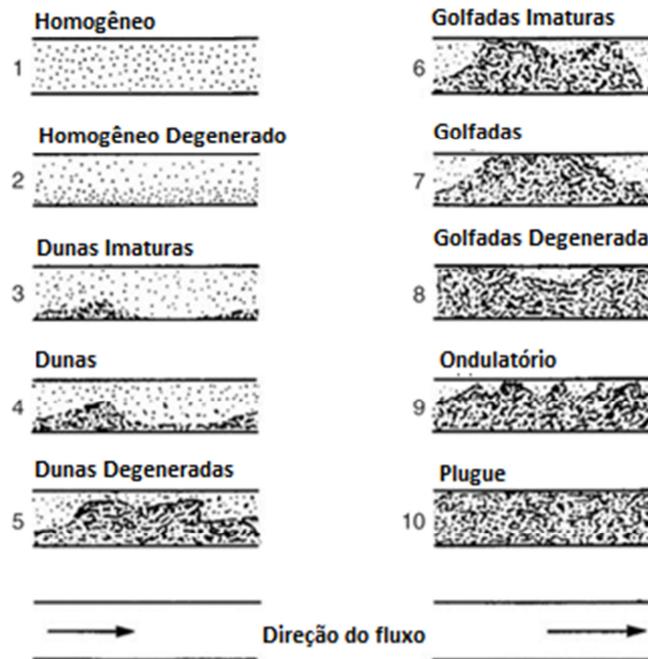


Figura 2. Padrões de escoamento gás sólido em tubos horizontais. Adaptado de Crowe (2005).

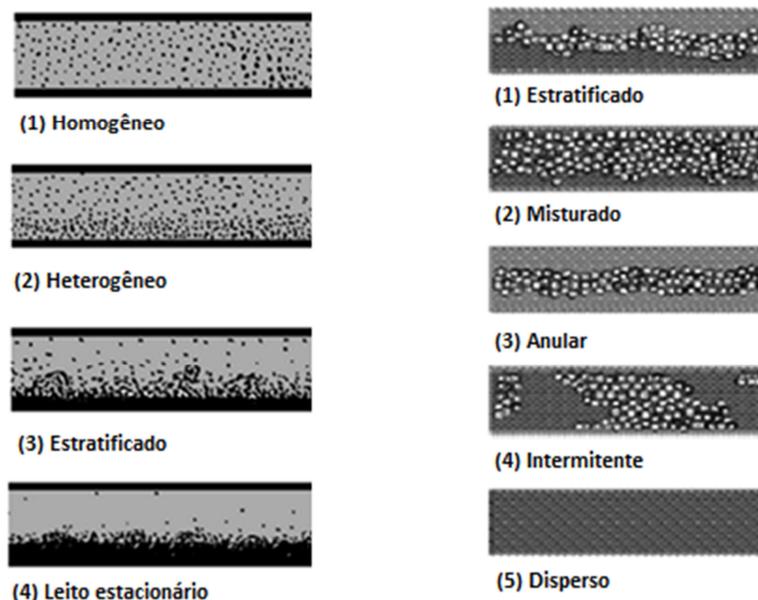


Figura 3. Padrões de escoamento líquido-sólido (à esquerda) e líquido-líquido (à direita). Adaptado de Bratland (2013) e Arirachakaran *et al.* (1989).

A identificação dos padrões de escoamento está diretamente relacionada com a detecção de vazamentos (Paladino, 2001; Duarte, 2007), prevenção da corrosão e da erosão da tubulação em diferentes tipos de escoamentos (Postlethwaite e Nesic, 2000), na redução da queda de pressão que incide na redução de custo com bombeamento (Pacheco, 2007; Barbosa, 2004) e na redução da fadiga mecânica das tubulações, dentre outros.

### 3. SISTEMAS DE CONTROLE NO TRANSPORTE DE MATERIAIS ATRAVÉS DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS EM TUBULAÇÕES E SEUS DESAFIOS TECNOLÓGICOS

Devido aos diferentes tipos de escoamentos multifásicos como apresentado no item anterior, muitas devem ser as estratégias de composição do sistema controle de escoamentos multifásicos já que, para cada elemento integrante, existem diferentes instrumentos, equipamentos e técnicas. Todos os elementos possuem seus desafios tecnológicos e a escolha do sistema mais adequado deverá levar em consideração os seguintes fatores:

características do processo, custo, complexidade, segurança, grau de confiabilidade na representação dos dados, tempo de resposta, dentre outros (Sidsel, 2005).

### 3.1 Sistemas de Controle em Malha Aberta e em Malha Fechada

Segundo Groover (2011), existem dois tipos básicos de sistema de controle: os de malha aberta e os de malha fechada. O sistema de malha fechada é mostrado na Fig. 4. Ele também é conhecido como controle por realimentação e pode ser implantado para que ocorra de maneira automática. Neste caso, o valor da variável de saída é comparado com um parâmetro de entrada e a diferença entre eles é utilizada para fazer com que a saída esteja em conformidade com o parâmetro de entrada. Podendo ser dividido em seis partes: (1) parâmetro de entrada, (2) processo, (3) variável de saída, (4) sensor por realimentação, (5) controlador e (6) atuador.

O parâmetro de entrada é o valor desejado para a variável de saída. Por exemplo, a assinatura de um padrão de escoamento indesejado. A variável de saída é a variável sendo monitorada e controlada, a qual, neste exemplo, são os sinais gerados pelos padrões do escoamento na tubulação. Um instrumento (sensor) é usado para medir a variável de saída ou de processo. Sendo responsável por realimentar o sistema em malha fechada, o qual poderá ser um transmissor eletrônico que gera sinais para o controlador. Por sua vez, o controlador trata o sinal proveniente do sensor, obtém a assinatura do padrão de escoamento e faz sua comparação com o parâmetro de entrada. Depois, ele gera um sinal corretivo para que o atuador atue sobre o processo visando manter ou alterar o padrão do escoamento.

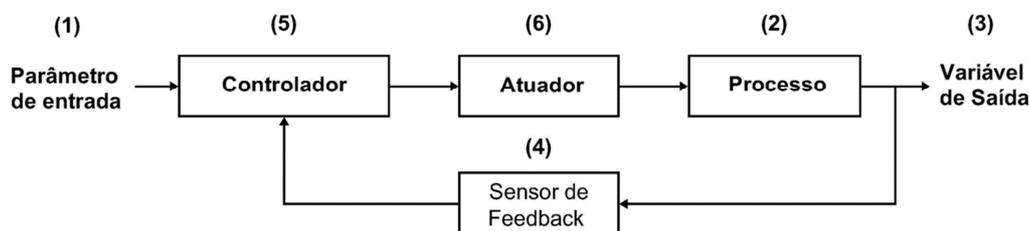


Figura 4. Sistema de controle por realimentação (Groover, 2011).

Diferentemente, o controle em malha aberta não possui uma malha de realimentação, ou seja, a realimentação (4) é feita manualmente por um operador. Portanto, não há comparação automática entre o valor da variável de saída e o parâmetro desejado e, com isso, fica na dependência da intervenção humana que deve de início identificar visualmente o padrão de escoamento, o que representa uma desvantagem ou mesmo o torna inviável em algumas aplicações. Este tipo de controle tem a vantagem de ser mais simples e de custo mais reduzido do que os de malha fechada (Groover, 2011).

### 3.2 Elementos Integrantes de um Sistema de Controle de Escoamento Multifásicos

Em se tratando de escoamentos multifásicos, os desafios tecnológicos são simultaneamente, intrínsecos aos três elementos principais: ao sensor (4), ao controlador (5) e ao atuador (6) da Fig. 4.

Em relação ao sensor, os chamados medidores de linha são capazes de medir diretamente uma grandeza do escoamento multifásico sem a necessidade da separação das fases. Ao longo do desenvolvimento da Instrumentação, surgiram muitos medidores de linha, aqueles baseados na pressão, no deslocamento positivo, nos raios X e gama, em princípios elétricos, ultrassônicos, dentre outros. Cada qual possui suas vantagens e desvantagens de acordo com a aplicação. Há também situações em que a separação total ou parcial das fases é realizada antes da medição utilizando medidores monofásicos, cuja tecnologia já se encontra bem desenvolvida (Crowe, 2005).

E relação aos sensores de pressão, todas as tomadas de pressão e transmissores de pressão requerem um mínimo grau de manutenção, inspeção, limpeza e controle metrológico. Dentre as desvantagens dos medidores utilizados com escoamentos multifásicos, os de deslocamento positivo que contêm peças móveis não devem ser expostos às impurezas contidas no escoamento. Os medidores de raios X e gama necessitam de cuidados especiais no manuseio e os elétricos podem apresentar resposta não linear. A maioria deles necessita de ajuste sempre que ocorrer uma mudança das propriedades dos fluidos. Por outro lado, a utilização de medidores com separação parcial algumas vezes é necessária quando os medidores em linha não apresentam valores de medições aceitáveis (Sidsel, 2005).

Em relação ao controlador, ele é responsável por adquirir e tratar o sinal de forma adequada através de um algoritmo computacional e, a partir daí, gerar um sinal de controle para o atuador. Técnicas de análise e/ou controle comumente discutidas na literatura são: baseadas na Estatística, transformada de Fourier, de Gabor ou de Hilbert Huang, nas redes neurais artificiais, lógica Fuzzy, Dynamic Time Warping – DTW, na teoria do Caos,

*Fractal, Probability Density Function* - PDF . A escolha dependerá da própria natureza do sistema em que será utilizado e da estratégia de controle adotada.

Baseados em parâmetros estatísticos, a média, desvio padrão, máximos, mínimos, etc, podem ser determinados diretamente a partir de uma série temporal, projetando a chamada “assinatura” do padrão de escoamento. Existem também métodos baseados no espectro do sinal, chamada de análise no espaço da frequência, o qual é determinado através da Transformada de Fourier a partir do qual outros parâmetros podem ser determinados como amplitude (ou potência) de componente(s) dominante(s), frequência central, largura do espectro, etc. Outros métodos espectrais são baseados na análise dos espaços conjugados tempo-frequência a partir da Transformada de Gabor ou *Wavelet* (Awotunde e Horne, 2012) e de Hilbert-Huang (Bin *et al.*, 2006). Existem, ainda, os métodos não espectrais baseados em fractais ou na Teoria do Caos (Cai *et al.*, 1996).

Em busca da identificação dos padrões, sinais podem ser diretamente comparados entre si através de convolução (dos Reis e Goldstein Jr, 2010) ou pelo chamado DTW (Pradeep *et al.*, 2012). Para os algoritmos de controle de sistemas não lineares, redes neurais artificiais (Roshani, 2014) ou lógica *Fuzzy* (Banasiak *et al.*, 2014), *Fractal* (Qian *et al.*, 2002), *PDF* (Guo Liejin *et al.*, 2009).

No controlador, o algoritmo completo, portanto, é composto por módulos distintos que desempenham funções específicas como: adquirir dados de entrada; extrair dos dados adquiridos as informações relevantes e um algoritmo encarregado de definir a classificação da amostra, ou seja, identificar o padrão de escoamento. A partir daí, tal informação pode ser utilizada para gerar um ou mais sinais de controle para os atuadores.

Em se tratando do terceiro elemento: o atuador, ele é responsável por operar diretamente sobre o processo, recebendo o sinal do controlador para corrigir o desvio em relação ao parâmetro de entrada. Atuadores comuns são as válvulas de controle, inversores de frequência e bombas, sendo que os atuadores que atuam sobre escoamentos multifásicos podem não atuar diretamente sobre o escoamento multifásico, mas sim sobre algumas das linhas de escoamento monofásico que, conseqüentemente, atuam sobre o escoamento multifásico, isto pelo fato de o controle direto sobre o escoamento multifásico ser mais complexo devido à fluidodinâmica inerentemente complexa desse tipo de escoamento pelos internos de um atuador.

### 3.3 Sistemas de Controle Automáticos de Escoamentos Multifásicos e seus Desafios Tecnológicos

Neste item, são discutidos alguns sistemas de controle automáticos encontrados na literatura, bem como seus desafios tecnológicos, sendo que, como discutido no item 3.2, existem diversas possibilidades de controle de escoamentos multifásicos através da combinação de diversos tipos de sensores, controladores e atuadores.

Pradeep *et al.* (2012), a fim de detectar a formação de um padrão golfado e controlá-lo, utilizou um sistema de tomografia por capacitância elétrica (ECT) e um sensor de pressão diferencial, como mostrado no diagrama na Fig. 5. Imagens da distribuição das fases na seção transversal da tubulação são geradas pelo sistema de ECT enquanto o transdutor de pressão diferencial também gera sinais ao longo do tempo. Inicialmente, o controlador, que é representado pelo conjunto de blocos delineados em vermelho, determina a fração volumétrica de cada uma das fases através de um algoritmo aplicado sobre as imagens geradas pela ECT (bloco  $\alpha_w$ ). Essa informação é usada nos dois blocos subsequentes, sendo que no bloco *slug length calculation* é usada para calcular o comprimento dos pistões de líquido (Fig.1 e padrão 8) e enviado para o bloco *Controller*. As informações da fração volumétrica (proveniente do bloco  $\alpha_w$ ) e da pressão diferencial medida pelo transmissor de pressão diferencial PDT 121 são correlacionadas no bloco DTW (*Dinamic Time Warping*). Esse último trata-se de uma ferramenta versátil capaz de estabelecer semelhanças entre duas ou mais medições em processos industriais. Neste caso, a informação resultante é fornecida ao bloco  $h_{DP}$  que, por sua vez, determina a magnitude das golfadas. Em seguida, a informação é enviada para o bloco *Controller*. Com base nas duas informações, o *Controller* envia um sinal de controle para as válvulas atuarem sobre a vazão de ar e água dos escoamentos monofásicos, eliminando, assim, a ocorrência do padrão golfado. Nesse sistema, é possível determinar a fração volumétrica de cada fase  $\alpha_w$ , a velocidade das golfadas  $V_s$ , a frequência dos pistões de líquido, o comprimento dos pistões  $L_s$ , o tempo entre as ocorrências dos pistões de líquido  $t_s$  e identificar o padrão de escoamento, assim como sua ocorrência e duração.

Yan e Mylvaganam (2012) também propuseram um sistema de controle utilizando ECT e transdutor de pressão diferencial. Entretanto, os autores utilizam lógica *Fuzzy* e redes neurais usando SOM (*Self Organization Maps*), como mostrado no diagrama da Fig. 6. Redes neurais são algoritmos computacionais com capacidade de permitir a identificação dos padrões de escoamento (Pacheco *et al.*, 2007). A lógica *Fuzzy* é utilizada para determinar parâmetros como velocidade, tamanho e frequência das golfadas e é utilizada para gerar o sinal de controle do escoamento multifásico.

O sistema funciona da seguinte forma: a partir dos dados gerados por tomografia capacitiva, o SOM determina o tipo de padrão de escoamento podendo haver dois tipos: em golfadas ou estratificado. Caso seja em golfadas, a partir da pressão diferencial medida pelos sensores de pressão é determinada o tipo de padrão em golfadas, isto é, se é de baixa, média ou alta frequência e, então, utilizando lógica *Fuzzy*, controla-se a válvula. Por outro lado, se o padrão for estratificado, a partir da pressão, a lógica *Fuzzy* é utilizada para controlar a

válvula, sendo que se a pressão for baixa aumenta-se a abertura da válvula, enquanto que se a pressão for média não se altera o estado da válvula, e se a pressão for alta se reduz a abertura da válvula.

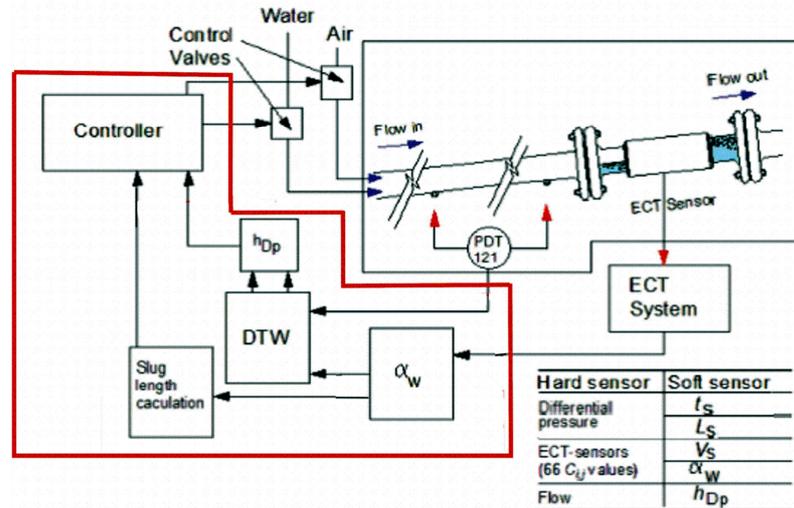


Figura 5. Diagrama em bloco de um sistema de controle. Adaptado de Pradeep *et al.* (2012).

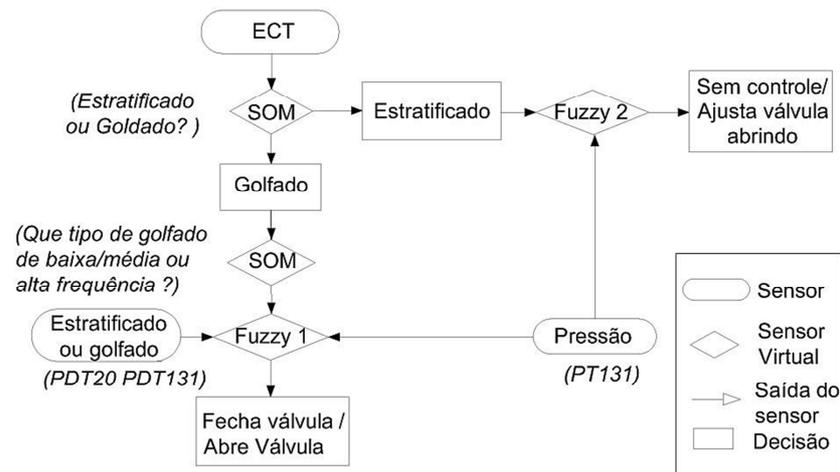
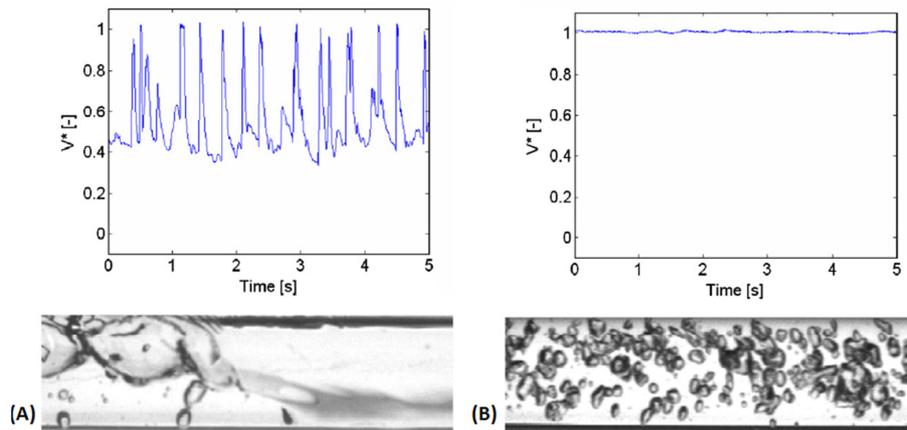


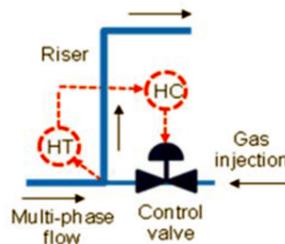
Figura 6. Fluxograma de um sistema de controle de escoamentos multifásicos. (Adaptado de Yan e Mylvaganam, 2012).

Um dos maiores desafios de sistemas de controle automáticos para escoamentos multifásicos está no fato de que o sistema deverá operar em “tempo real”, isto é, com intervalos de tempo muito pequenos, o que exige tecnologia veloz e precisa além de que os blocos se comuniquem eficientemente. Tudo isso pelo fato dos escoamentos multifásicos apresentarem natureza intrinsecamente instável, o que muitas vezes ocasiona sinais com os mais diferentes aspectos como os de flutuação de pressão como mostrado na Fig. 7, onde no eixo das abscissas tem-se o tempo em segundos e na das ordenadas a tensão na saída do sensor. Esses sinais se referem a um sistema para identificação e controle de padrões de escoamento (Canière *et al.* 2007), em (a) tem-se um sinal proveniente de um padrão em golfadas e em (b) tem-se para um padrão em bolhas dispersas.

O atuador deverá ser especificado adequadamente já que ele é o elemento final do sistema de controle que, portanto, irá agir diretamente sobre o escoamento multifásico. Dos Reis (2013) discutiu sobre a utilização de uma junção T na linha principal de escoamento ar-água, com intuito de separar o gás do líquido de um padrão em golfadas. Os atuadores foram às válvulas instaladas diretamente nos ramais de saída. Apesar do autor não ter proposto um sistema automático de controle, há evidente potencial para tal. Krma *et al.* (2012) utilizou um sistema de injeção de gás para atenuar o padrão golfado, sendo que a injeção de gás é controlada por uma válvula que, por sua vez, é controlada por um sistema PI como mostrada na Fig. 8.



**Figura 7. Sinais provenientes de padrões de escoamento: golfado (A) bolhas dispersas (B). Adaptado de Canière *et al.*(2007).**



**Figura 8. Válvula de controle de injeção de gás para escoamento em padrão golfado (Krima *et al.*, 2012).**

Pagano (2009) utilizou uma técnica chamada SMS (*Sliding Mode Control*) para controle do padrão golfado, no qual objetiva introduzir um movimento de deslizamento juntamente com um deslizamento superficial em uma bifurcação, a fim de controlar as oscilações de taxa de escoamento e pressão responsáveis por induzir a formação das golfadas.

Finalmente, se destaca que o maior desafio para estes sistemas é fazer com que todos estes elementos funcionem juntos e de forma eficiente.

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho discutiu sobre controle automático do processo de transporte por meio de escoamentos multifásicos, bem como os problemas associados aos padrões de escoamento. O assunto está diretamente relacionado ao retorno econômico pela detecção de vazamentos, prevenção de fadiga mecânica de suportes, tubos e acessórios, na prevenção de corrosão e erosão da tubulação, na redução da queda de pressão que incide na potência de bombeamento, dentre outros, e, portanto, na eficiência do próprio processo de transporte.

Em se tratando de escoamentos multifásicos, os desafios tecnológicos de um sistema de controle se devem ao conjunto todo formado pelos blocos sensor, controlador e atuador. Em relação aos sensores, os de pressão requerem inspeção e limpeza periódica, medidores de deslocamento positivo contém peças móveis que podem se danificar, medidores de raios gama e X, além das sondas elétricas, necessitam de ajustes periódicos em função das alterações no processo, especialmente das propriedades das fases. Para o controlador, o algoritmo completo é composto por módulos distintos que desempenham funções específicas como: adquirir dados de entrada; extrair dos dados adquiridos as informações relevantes e um algoritmo encarregado de definir a classificação da amostra, ou seja, identificar o padrão de escoamento e, a partir daí, tal informação pode ser utilizado para gerar um ou mais sinais de controle para os atuadores através de um algoritmo de controle. Há diferentes técnicas e estratégias de análise de sinais tanto para a identificação do padrão do escoamento quanto para o controle. Em se tratando do atuador, eles podem atuar sobre as linhas monofásicas ou diretamente sobre as linhas multifásicas, sendo que a válvula de controle é comumente utilizada.

Vários são os tipos de controle de escoamentos multifásicos possíveis, pois para cada elemento integrante, existem diferentes instrumentos e técnicas possíveis. A escolha da melhor estratégia deverá levar em consideração: as particularidades dos materiais a ser transportados, a(s) grandeza(s) de medição ou

sensoriamento e, como consequência, as características dos sinais gerados, as condições de operação com destaque para os padrões de escoamento, o tempo de resposta necessário, além da precisão desejada e do custo.

Para trabalhos futuros, pretende-se montar uma bancada para experimentos dinâmicos em relação ao escoamento multifásico, bem como controle automático do sistema.

## 5. AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Emerson dos Reis, meu orientador, pela colaboração, paciência e seus conhecimentos repassados durante todo o desenvolvimento do trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS

- Awotunde, A.A., Horne, R., 2012, “An Improved Adjoint-Sensitivity Computation for Multiphase Flow Using Wavelets”, Society of Petroleum Engineers, Vol. 17, No. 2, pp. 402-417.
- Arirachakaran, S., Oglesby, K.D., Malinowsky, M.S., Shoham, O., e Brill, J.P., 1989, “Uma análise dos fenômenos de óleo / fluxo de água em tubos horizontais”. Trabalho apresentado no Simpósio de Produção Operação SPE.(SPE 18836), Oklahoma, Estados Unidos.
- Attia, M., Mahmoud, M.A., Abdulraheem, A., Al-Neaim, S.A. Evaluation of the Pressure Drop due to Multi Phase Flow in Horizontal Pipes Using Fuzzy Logic and Neural Networks. Society of Petroleum Engineers, pp.11.
- Banasiak, R., Wajman, R., Jaworski, T., Fiderek, P., Fidos, H., Nowakowski, J., Sankowski, D., 2014, “Study on two-phase flow regime visualization and identification using 3D electrical capacitance tomography and fuzzy-logic classification”. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 58, p. 1-14.
- Barbosa, A., 2004, “Efeitos de Transientes na Perda de Carga no Escoamento Óleo – pesado em Regime Anular em Duto Metálico”, Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Bin, S., Zhang, H., Cheng, L., Zhao, Y., 2006, “Flow regime identification of gas-liquid two-phase flow based on HHT”, Chinese Journal of Chemical Engineering, Vol. 14, No. 1, pp. 24-30.
- Bratland, O., 2013, “Pipe flow 2. Multi-phase Flow Assurance”, ISBN 978-616-335-926-1
- Cai, Y., Wambsganss, M.W., Jendrzeczyk, J.A., 1996, “Application of chaos theory in identification of two phase flow patterns and transitions in a small, horizontal, rectangular channel”, Vol. 118, No. 2, pp. 8.
- Canière, H., Joen, C. T., Willockx, A., Paepe, M.D., 2007. Capacitance signal analysis of horizontal two-phase flow in a small diameter tube. Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 32, No. 3, pp. 892-904.
- Chisholm, D., 1983 .Two-phase Flow in Pipelines and Heat Exchangers. Pitman Press Ltd, New York.
- Costa Carosio, G. L., 2009, “Sistema de identificação de padrões de escoamento bifásico em oleodutos, gasodutos e linhas de vapor”, Processo 09/09690-4.
- Crowe, C.T., Ed., 2005, “Multiphase Flow Handbook”, 1<sup>o</sup> Ed. CRC Press, 1156 p.
- Dos Reis, E., Goldstein Jr., L., 2010, “Characterization of slug flows in horizontal piping by signal analysis from a capacitive probe”, Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 21, No. 3 , pp. 247-355.
- Dos Reis, E., Goldstein Jr., L., 2013, “Fluid dynamics of horizontal air–water slug flows through a dividing T-junction”, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 50, pp. 58-70.
- Duarte, V. J. L., 2007, “Estudo e Implementação de Técnicas Sônicas para a Detecção de Vazamento em Dutos com Regime de Escoamento Multifásico”, Monografia (Graduação em Engenharia da Computação), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Dos Santos, G.R., 2006, “Desenvolvimento de Técnicas de Ultra-som para Medida de Espessura de Filme de Líquido em Escoamentos Gás-Líquido e Líquido-Líquido”, Universidade Estadual de Campinas, Dissertação (Mestrado em Interdisciplinar em engenharia Ciência e Engenharia de Petróleo, Campinas).
- Groover, M., 2011, “Automação Industrial e Sistemas de Manufatura”, 3<sup>o</sup> Ed. Pearson.
- Guo Liejin., Bofeng, B., Liang ,Z., Xin, W., Hanyang., 2009, “Online recognition of the multiphase flow regime and study of slug flow in pipeline”, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 147, No. 1, pp. 1-39.
- Heywood, N.I., Cheng, F.C.H., 1984, “Flow in pipes – multiphase flow”, Physics and Technology, Vol. 15, pp. 291-314.
- Krima, H., Cao, Y., Lao, L., 2012, “Gas injection for hydrodynamic slug control”, Proceedings of the 2012 IFAC Workshop on Automatic Control in Offshore Oil and Gas Production. Trondheim, Noruega.
- Liejun, G., Bofeng, B., Xuejun, C., 2004, “Nonlinear feature analysis and automatic pattern recognition of oil-gas-water multiphase flow”, 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, Jiaotong, China;
- Pacheco, F., Cavalcante, C.C.P., Mendes, J.R.P., Bannwart, A.C., Serapião, A.B.S., 2007, “Identificação de padrões de escoamento multifásico e determinação da perda da carga com o auxílio de rede neurais”, 4<sup>o</sup> PDPETRO, São Paulo, Brasil.

- Pagano, D. J., Plucenio, A., Traple, A., 2009., “Slug-flow control in submarine oil-risers using SMC strategies”, International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes, Vol. 7, No.1, pp. 566-571.
- Paladino, E.E., 2005, “Estudo do escoamento multifásico em medidores de vazão do tipo pressão”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.
- Powell, R. L., 2008, “Experimental techniques for multiphase flows”, Physics of Fluids, Vol. 20, pp. 1-20.
- Pradeep, C., Yan, R., Mylvaganam, S., 2012, “Co-operative sensor fusion using time warping in multimodal tomometry for process control”, IEEE Conference on Control, Systems and Industrial Informatics (ICCSII), pp. 219 -214.
- Qian, H., Hu, Z., Sun, H., Zhou, F., 2002, “Fractal characteristics of oil-gas-water multiphase flow”, Journal of Thermal Science, Vol. 11, No. 1, pp. 49-52.
- Sausen, A., Sausen, P., Campos, M., 2012, “Chap 5: The Slug Flow Problem in Oil Industry and Pi Level Control”, In: New Technologies in the Oil and Gas Industry, 1º Ed., Intech.
- Sidsel *et al.*, 2005, “Handbook Multiphase Flow Metering”, Norwegian Society for Oil and Gas Measurement,
- Yan, R., Mylvaganam, S., 2012, “Neuro-fuzzy methods/or slug detection and control in multi- phase flow based on differential pressure and electrical capacitance tomometry (ECTm)”, IEEE Conference on Control, Systems and Industrial Informatics (ICCSII), pp. 225-230.
- Roshani, G.H., Fegghi, S.A.H., Mahmoudi-Aznaveh, A., Nazemi, E., Adineh-Vand, A., 2014. “Precise volume fraction prediction in oil–water–gas multiphase flows by means of gamma-ray attenuation and artificial neural networks using one detector”, Vol. 51, pp. 34-41.
- Ruscheinsky, I., 2011. “Estudo e Aplicação de Estratégias de Controle em um Separador de Produção considerando o Regime de Fluxo com Golfadas na Produção de Petróleo”. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí.
- Zhang, 1996, “Designing a cost effective and reliable pipeline leak detection system”, Pipeline Reliability Conference, Houston, EUA.

## 7. NOTAS DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso incluídos nesse trabalho.

# AUTOMATIC CONTROL OF TRANSPORTATION OF MATERIALS THROUGH FLOW IN PIPES MULTIPHASE: A CONTRIBUTION BASED ON THE LITERATURE

**Breno Peres Guimarães Félix, brenofelixifsp@gmail.com<sup>1</sup>**  
**Emerson dos Reis, emersonr@ifsp.edu.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP, campus of São João da Boa Vista, Acesso Dr. João Batista Merlin, S/N – Jd. Itália, São João da Boa Vista/SP, CEP.13872-551.

**Abstract.** *Based on the literature, the automatic control applied to multiphase flows through pipes, which may contain composed by immiscible phases, gases or particulate solids liquids, is discussed in this paper. Basically, an automatic control system consists of three blocks: the sensor, the controller and actuator. The sensor block is composed of one or more measuring instruments. The signals generated by these instruments are used to identify the flow pattern. In the controller, different techniques of signal analysis based on time and spectral analysis on Statistics, Fourier, Gabor and Hilbert Huang transforms, and other based on Chaos Theory, etc., can be used depending on the characteristics of the system, and control algorithms based on artificial neural networks, fuzzy logic, etc. also can be used. The actuator is the third block, and it operates directly on the multiphase lines or even on the associate single-phase lines. The can be represented by valves, frequency inverters coupled to electric motors and hydraulic pumps, etc. Based on the complex nature and on the different types of multiphase flows, different combinations and strategies allow a variety of control systems, and the choice of the best strategy should take into account: the particularities of the materials being transported, the quantity or quantities to be measured or sensed and, therefore, the characteristics of the generated signals, the operating conditions especially the flow patterns and installation requirements, the required time response, the desired accuracy and the whole cost.*

**Keyword:** *control, multiphase flows, industrial processes.*