

Controle de Processos

Aula 07 - Controle de vazão

Apresentação

Nesta aula, estudaremos o controle de vazão. Logo conheceremos detalhes sobre como malhas industriais são controladas e os principais equipamentos empregados no controle. Foi utilizada uma planta didática da SMAR para a realização de experimentos com o controle de vazão de água que trafega por uma tubulação. A planta pertence ao Laboratório de Automação em Petróleo (LAUT) da UFRN. Vamos nessa!



Vídeo 01 - Apresentação

Objetivos

Ao final desta aula, os alunos deverão estar aptos a:

- Aplicar o controle das variáveis de vazão em processos industriais.

A Grandeza Vazão

A vazão é uma grandeza definida como sendo a quantidade de massa por unidade de tempo. Em unidades industriais, é comum se desejar manter a vazão de uma determinada corrente do processo. A entrada de um gás - por exemplo, em uma coluna de destilação - usualmente precisa ser controlada para que se tenha ideia do quanto de massa essa coluna recebe por unidade de tempo. Nesta aula, abordaremos a questão da medição da vazão de [fluidos](#) (É uma substância que tem a capacidade de escoar. Quando um fluido é submetido a uma força tangencial, deforma-se de modo contínuo, ou seja, quando colocado em um recipiente qualquer, o fluido adquire o seu formato (líquidos e gases, por exemplo).) (de água, por meio de um elemento sensor), a maneira de como variar a vazão em uma corrente de processo (a partir de um elemento atuador, a válvula de controle) e as estratégias de controle que geralmente empregam para controlar malhas de vazão.



Vídeo 02 - Definindo o Controle de Vazão

Características Estáticas dos Elementos de Medida

Estudamos que um sistema de medida possui características dinâmicas e que a velocidade de resposta (velocidade de envio da informação da variável medida) deve ser a maior possível, se não quisermos introduzir atrasos na ação da cadeia de controle. Isso equivale a dizer que a constante de tempo dos elementos de medida e transmissão não deve ser alta em relação às constantes de tempo dos restantes sistemas da cadeia.

Além das características dinâmicas do sistema de medida, são muito importantes as seguintes propriedades:

Precisão - Exprime o grau de conformidade do valor indicado pelo sistema de medida com o valor real da grandeza. É representada pelo desvio, expresso em percentagem, entre o valor medido e o valor real da grandeza.

Linearidade - Significa que a função que relaciona a variável de saída com a de entrada é uma função linear (geometricamente representada por uma reta inclinada). Os desvios à linearidade são expressos em percentagem.

Histerese - Diferença entre valores indicados pelo sistema de medida para um mesmo valor da grandeza medida, quando esse valor é atingido por valores crescentes ou por valores decrescentes.

Repetitividade - Representa a exatidão com a qual se obtém a mesma medida quando ao longo do tempo se aplica a mesma entrada. É também indicada em percentagem.

Banda (São utilizados, por vezes, o termo banda e faixa) morta - Corresponde a folgas e insensibilidades do sistema de medida. Significa o desvio máximo que se pode introduzir na entrada do sistema sem haver qualquer variação no valor de saída.

Sensibilidade - Representa a relação entre o sinal de saída e o sinal de entrada. Para o mesmo sinal de entrada, a saída é tanto maior quanto maior for a sensibilidade. Um conceito praticamente sinónimo é o de **GANHO** (É frequente tomar-se sensibilidade como o menor desvio da variável de entrada que o instrumento pode detectar. Tomada neste sentido, sensibilidade seria o sinónimo de banda morta.).

Medição de Vazão



Vídeo 03 - Características de Controle de Vazão

A medição de vazão em plantas industriais pode ser feita através de diversas técnicas, ou seja, existem muitos métodos básicos para a medida de vazão (alguns são bastante gerais, outros se aplicam em casos restritos). Entre os elementos primários de medida de vazão podemos citar:

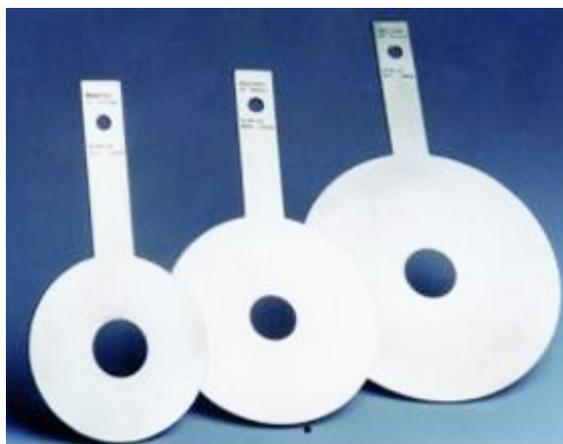
- Placas de orifício
- Bocais de vazão
- Tubos venturi
- Tubos pitot
- Rotativos (contadores e turbinas)
- Medidores do tipo vortex
- Tipo Coriolis
- Eletromagnéticos
- Ultrassônicos
- Outros

Dentre as técnicas citadas, a placa de orifício (elementos de medida de vazão de pressão diferencial) é uma das mais comuns e empregadas em medição de vazão em processos industriais. Segundo Campos e Teixeira (2010), o princípio básico de funcionamento de uma placa de orifício consiste no uso de uma placa de aço inox (pois tem que resistir à corrosão química e mecânica do fluido), com um orifício

usinado no centro, que é inserida numa linha de processo perpendicular ao movimento do fluido, com a intenção de produzir uma queda de pressão (ΔP). A Figura 1 apresenta a foto de algumas placas de orifício industriais.

Nota: Existem diversos meios de se medir vazão (com maior exatidão), normalmente usados para contabilizar a produção ou mesmo para faturamento, tanto para líquidos como para gases (ALVES, 2010). Esses medidores destinam-se a contabilizar a produção, enquanto as placas de orifício são usadas tanto na medição como no controle de processos.

Figura 01 - Placas de orifício.



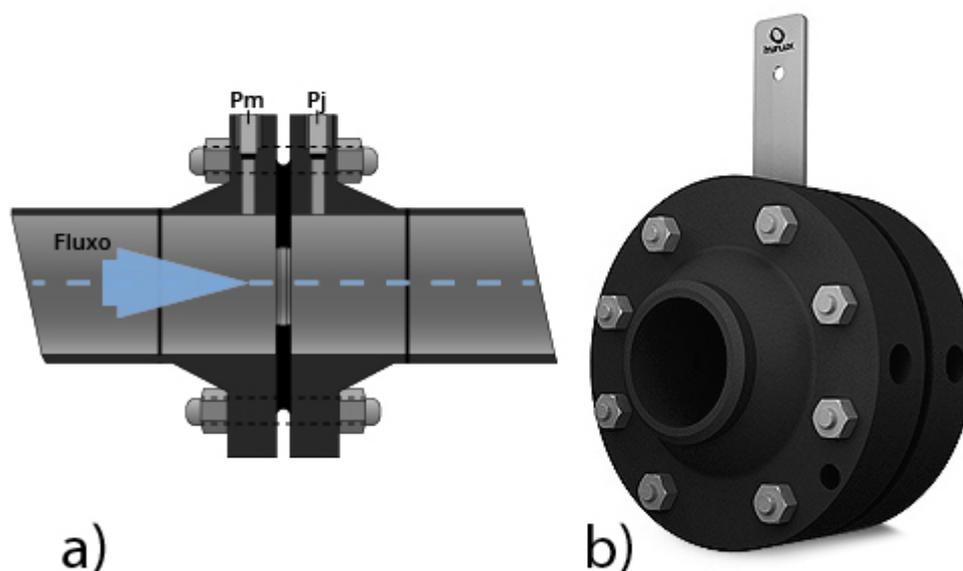
Fonte: Disponível em <<http://www.jornalforumdaindustria.com.br/caderno/medicao-de-vazao-por-placas-de-orificio>> Acesso em: 09 ago. 2013.

As tomadas para medida das pressões a montante (entrada) e a jusante (saída) podem estar localizadas em várias posições (tomadas na *flange* é muito comum). As tomadas na *flange* (utilizada para montagem de placa de orifício) têm vantagens não apenas porque existem dados empíricos de mais confiança para esse tipo de tomadas, como permitem uma fácil substituição do conjunto orifício-flanges. A precisão nas medidas com orifícios é raramente melhor do que 1%. Normalmente o erro é superior a 2%.

Um arranjo comum é dado na Figura 2. A placa de orifício é fixada entre *flanges*, o que torna fácil sua instalação e manutenção. Montado na tubulação de forma que o fluido passe através do orifício da placa, sua função é aumentar a velocidade do fluido, diminuindo a área da seção do fluxo para haver uma queda de pressão. A

vazão pode então ser medida a partir dessa queda. A *flange* já possui furos incorporados para as tomadas de pressão em cada lado (rosca ou encaixe para solda).

Figura 02 - (a) Arranjo comum da instalação de uma placa de orifício em uma tubulação para medição de vazão (P_m - pressão a montante e P_j - pressão a jusante). **(b)** Flange com a placa de orifício montada.



Fonte: (a) Adaptado de <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgLmlAl/instrumentacao-industrial-modulo-i-aula-iii-vazao-rev1?part=2>>. Acesso em 03 fev. 2016.
(b) <http://www.ituflux.com.br/produto/flange-de-orificio-13#interna>>. Acesso em: 03 fev. 2016.

A medição da diferença de pressão ($P_m - P_j$) pode ser feita por algo simples, como um manômetro e uma tabela ou uma fórmula pode ser usada para calcular a vazão. Ou pode ser coisa mais sofisticada, como transdutores elétricos e o sinal processado por circuitos analógicos ou digitais para indicação dos valores de vazão.

Uma vantagem primordial desse dispositivo medidor de vazão por pressão diferencial é que podem ser aplicados a uma grande variedade de medições, envolvendo a maioria dos gases e líquidos, inclusive fluidos com sólidos em suspensão, bem como fluidos viscosos, em uma faixa de temperatura e pressão bastante ampla.

Um inconveniente desse tipo de medidor é a perda de carga que ele causa no processo.

A perda de pressão é dada pela seguinte expressão:

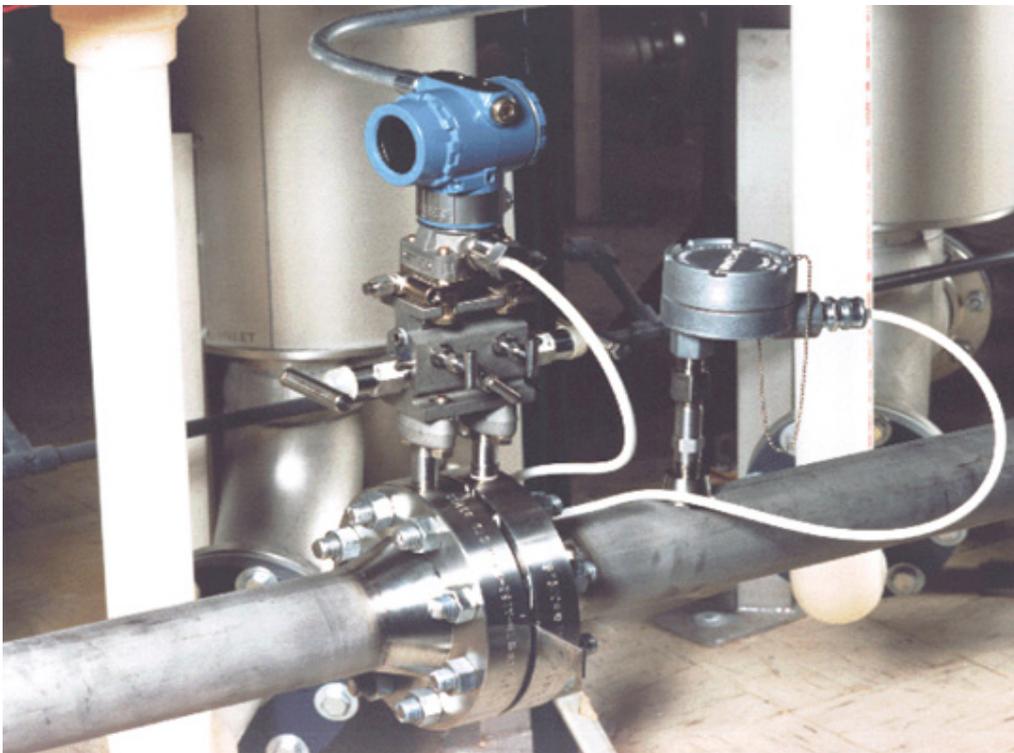
$$Q = F * \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

Em que Q representa a vazão volumétrica, dada em m³/h; ΔP é a perda de pressão provocada pelo orifício, dada em kgf/cm²; F (depende das características do sistema como um todo) é um fator de medição utilizado e ρ é a massa específica do fluido.

Um detalhe importante a ser observado é que a vazão depende da raiz quadrada do diferencial de pressão. Na prática, portanto, os sensores empregados para se medir vazão medem, na verdade, o diferencial de pressão causado pela placa de orifício. Para se obter o valor da vazão é necessário, então, extrair essa raiz quadrada. Estamos, pois, em presença de uma medida indireta de vazão.

A Figura 3 ilustra um instrumento que mede pressão diferencial sendo empregado na medição da vazão.

Figura 03 - Sensor de pressão diferencial utilizado para medição de vazão.



Fonte: Disponível em <<http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/189>> Acesso em: 09 ago. 2013.

Atualmente, muitos instrumentos já fornecem o valor medido para o controlador com a raiz quadrada extraída, o que evita a efetuação de cálculos extras para obter a vazão que será controlada.

Um detalhe que é importante ressaltar é que as placas de orifício, segundo Campos e Teixeira (2010), apresentam uma rangeabilidade relativamente baixa. A rangeabilidade é a relação entre o valor máximo e mínimo mensuráveis que, em placas de orifício, é de 3:1, em média.

Para uma medição de vazão adequada, o elemento primário deverá ser instalado obedecendo aos requisitos de trechos retos de tubulação antes e depois do mesmo, para que a medida não seja prejudicada pelo turbilhamento no fluido.

Campos e Teixeira (2010) comentam que no controle de vazão, o tempo morto do processo (malha de vazão) é normalmente desprezível e a constante de tempo é da ordem de segundos. Isto implica que a resposta do sistema de controle de vazão depende principalmente do tempo de resposta do elemento primário (sensor de vazão), do tamanho da tubulação do processo, da transmissão de sinal e do elemento final (atuador no processo - por exemplo, válvula de controle).

Atividade 01

1. Faça uma pesquisa sobre rangeabilidade em instrumentos de medida. Quais as implicações de se ter, no caso das placas de orifício, uma rangeabilidade de 3:1?

Válvulas de Controle de Vazão

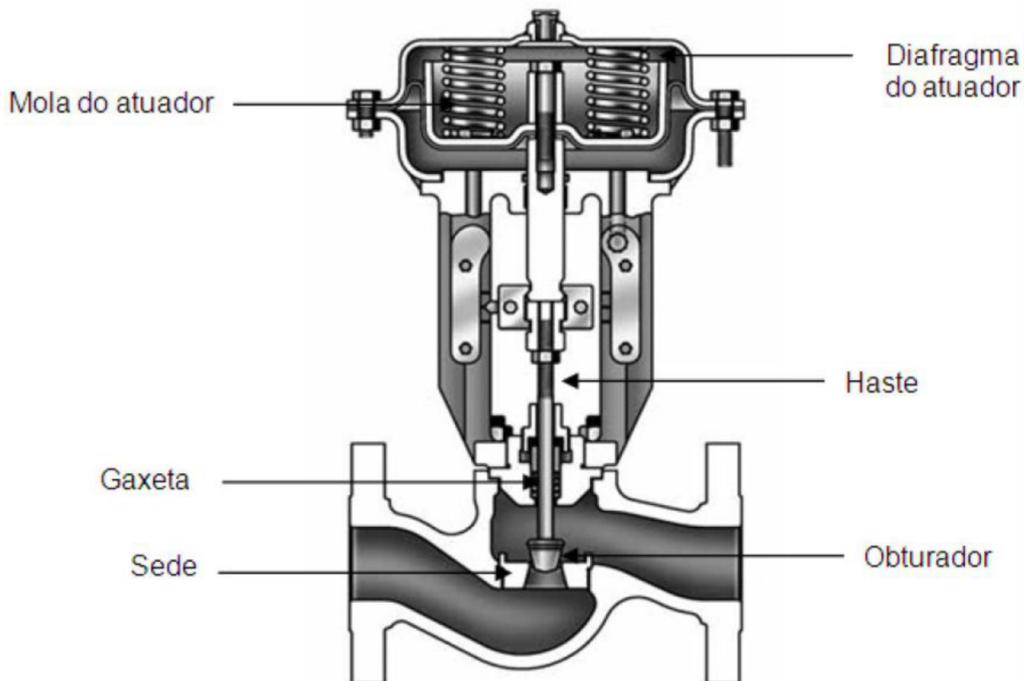
Toda malha de controle de processos contém um elemento final de controle, o dispositivo pelo qual permite que uma variável de processo seja manipulada. Para a maioria dos processos industriais, os elementos finais de controle ajustam a vazão de materiais e, indiretamente, as taxas de transferência de energia para o processo (GARCIA, 2013).

O método mais simples e mais usado para manipular fluidos nas indústrias de processos é empregar uma válvula de controle, que são os elementos atuadores mais comuns. Elas atuam manipulando a vazão de algum tipo de fluido, como gás, água, produtos químicos ou vapor, com o objetivo de compensar alguma perturbação e manter as variáveis de processo o mais próximo possível do valor desejado

Nota: Como esse material não está direcionado para um curso de instrumentação, sugerimos leituras adicionais sobre válvulas de controle, pois existem alguns tipos de válvulas com diferentes características e o que será abordado aqui é algo mais comum. Uma boa leitura para aprofundamento está em CONTROL (1998). Nessa leitura, você encontrará mais detalhes sobre tipos de válvula, dimensionamento, características dinâmicas, etc. Outra sugestão é uma primeira leitura do autor Artur Cardozo Mathias - *Controle de Fluxo Através de Válvulas Manuais e Automáticas, Válvulas no processo de fabricação de celulose e papel* e em seu livro **Válvulas: Industriais, Segurança e Controle, Artliber Editora.**

Tais válvulas tipicamente utilizam algum tipo de acionador mecânico para mover o obturador da válvula em sua sede, abrindo ou fechando a área para a passagem do fluido. O acionador mecânico pode ser um motor de corrente contínua, um motor de passo, um atuador eletromagnético ou ainda um atuador pneumático constituído por um diafragma operando pneumaticamente e que move a haste da válvula contra a força oposta de uma mola fixa, sendo este último o mais comum e o mais barato (GARCIA, 2013). Na Figura 4, tem-se as partes constituintes de uma válvula de controle pneumática típica com diafragma.

Figura 04 - Válvula de controle pneumática do tipo globo.



Fonte: ALMEIDA (2015).

A válvula tem a função de regular a taxa de vazão do fluido que trafega por seu corpo, conforme a posição de sua haste ou disco é variada, de acordo com a força aplicada por seu atuador. Para tanto, a válvula não deve possuir nenhuma espécie de vazamento, deve ter as dimensões necessárias e suficientes para a demanda de fluido imposta a ela, tem que ser capaz de lidar com as possíveis características erosivas, corrosivas e térmicas do processo (PAIOLA, 2008).

Resumidamente: As válvulas de controle de vazão são equipamentos que possibilitam variar a área da seção transversal da corrente a qual estão ligadas. Essa variação provoca a variação de vazão desejada.

Ainda em Garcia (2013), é enfatizado que apesar do crescente uso de válvulas motorizadas, a maioria das aplicações de controle de processos utiliza válvulas de controle pneumáticas. Como é muito comum ter-seo uso de controladores eletrônicos analógicos ou digitais controlando válvulas pneumáticas, pode ser necessário introduzir na malha um conversor I/P (corrente/pressão), que converte corrente (sinal proveniente do controlador) para pressão (sinal proveniente de um

compressor para alimentação da válvula), tipicamente 4-20 mA para 3-15 Psi, o qual é normalmente assumido com característica linear e dinâmica desprezível (muito rápido), resultando em uma função que meramente consiste em um ganho estacionário K_{IP} :

$$K_{IP} = \frac{\Delta P}{\Delta M} = \frac{(15 - 3)Psi}{(20 - 4)mA} = \frac{12Psi}{16mA} = 0.75 \frac{Psi}{mA}$$

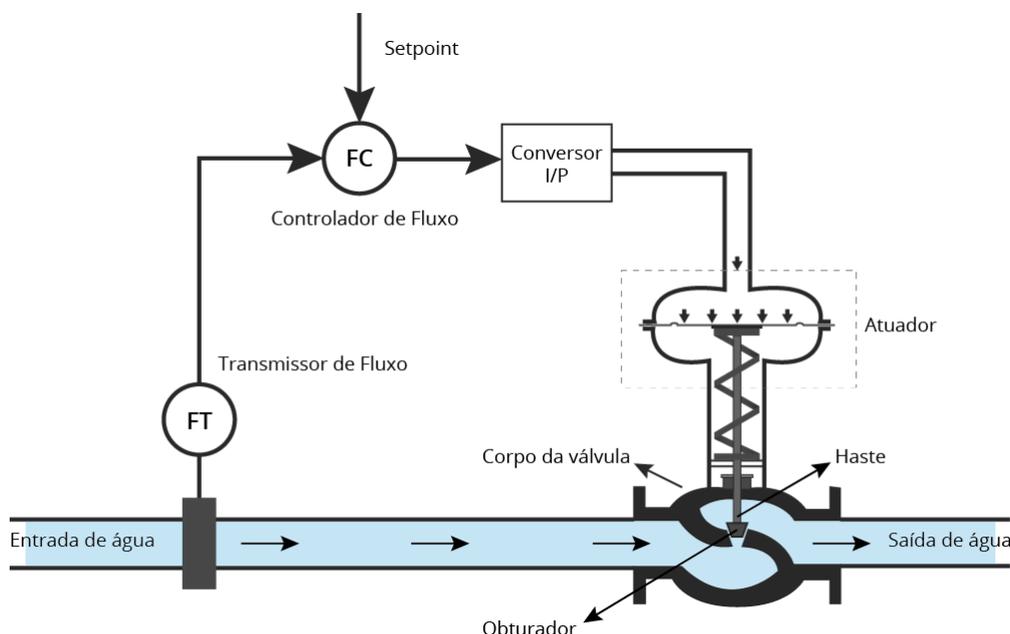
onde:

ΔP : faixa de variação de saída do conversor I/P (3-15 Psi).

ΔM : faixa de variação do sinal de entrada do conversor I/P (4-20 mA), correspondente à saída do controlador.

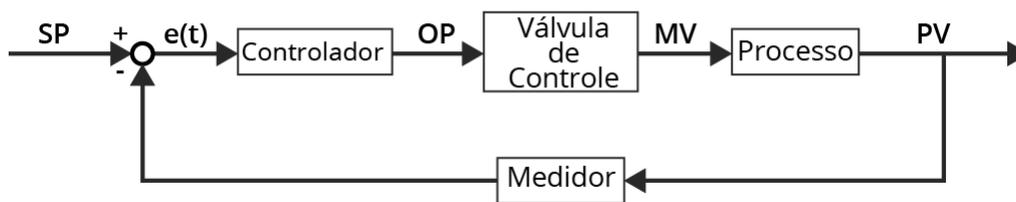
As Figuras 5 e 6 ilustram, de maneira simplificada, os diagramas do sistema de controle de vazão típicos. Aqui a vazão será controlada por meio de um controlador PI paralelo clássico (*Flow controller*), conectado a uma válvula de controle.

Figura 05 - Diagrama esquemático da malha de vazão.



Fonte: Mishra et al. (2014).

Figura 06 - Diagrama de blocos simplificado da malha de controle de vazão.



A Figura 6 mostra o diagrama de blocos de um circuito de controle de fluxo de processos com atuação da válvula de controle pneumática (elemento de controle final). O controlador no circuito produz uma saída como uma função do erro a partir da diferença entre a referência (SP) e o valor medido da vazão (PV). A saída do controlador (sinal elétrico) será alterada (conversor I/P) de forma a alimentar a válvula de controle pneumática. A Figura 5 exibe o diagrama esquemático para o circuito de controle de fluxo. A posição da haste (**Stem**) da válvula de controle regula o fluxo e a variável manipulada MV na Figura 6 é a posição em que se encontra a haste.

Nota: Em controle de processos todos os valores das variáveis, tais como: SP, $e(t)$, OP, MV e PV da Figura 6 são geralmente normalizadas na faixa de 0% a 100% dos valores medidos. Sendo assim, como o sinal do controlador OP normalmente corresponde a 4-20 mA, então 4 mA corresponde a 0% e 20 mA a 100% da faixa, e assim por diante. Portanto, a referência SP deve ser inserida também em porcentagem, por exemplo, pode ser solicitada uma vazão de 70% da capacidade máxima do processo.

Em vez de possuir apenas um atuador, as válvulas pneumáticas de controle podem ser equipadas com um posicionador, um tipo de dispositivo de realimentação mecânica que mede a posição real da haste da válvula, compara-a com a posição desejada e ajusta a pressão de ar para a válvula, de acordo com essa diferença (GARCIA, 2013). Esse dispositivo se torna importante, pois na indústria existem válvulas que operam em malha aberta, ou seja, não há um controlador dedicado para corrigir a posição da haste. Em alguns casos o posicionador nada mais é do que um controlador tradicional PID acoplado a uma válvula de controle.

Nota: Na Figura 5 o controlador (no nosso caso o PI) é dedicado para corrigir a vazão da malha (não se tem informação da posição em que se encontra a haste da válvula). Para contornar esse problema, em determinadas malhas podem existir os posicionadores, controladores dedicados para operar a posição da haste da válvula (pode ser desejado apenas o controle de posição da haste e indiretamente tem-se o controle de vazão). Como veremos mais adiante, pode existir também na malha de controle o controlador para a vazão do processo e o posicionador para operar a posição da haste da válvula, ambos trabalhando em conjunto.

Problemas nas Válvulas de Controle

Em grande parte, o desempenho das malhas de controle está relacionado com o adequado funcionamento das válvulas de controle, elementos comuns nos processos industriais (elementos finais). Os principais problemas em válvulas de controle são:

Atrito Estático

O atrito estático é um fenômeno muito comum em atuadores com partes móveis. Como consequência, qualquer processo que utilize esses elementos estará sujeito a uma redução do desempenho na malha de controle. Um equipamento de alta qualidade e bom estado de conservação apresenta baixo atrito, portanto não prejudica o controle em malha fechada. Porém, a tendência ao longo dos anos é o aumento do atrito devido ao desgaste das peças, implicando em perda de produtividade, decréscimo na qualidade do produto ou aumento do custo de produção. Na literatura, o termo agarramento é usado para esta não linearidade.

Backlash (folga)

Movimento relativo que ocorre entre as partes móveis de um sistema mecânico, gerado pela folga entre essas partes, tipicamente quando o sentido do movimento sofre mudança.

Nota: Por sentido de movimento sofrer mudança, entenda a haste da válvula subindo e depois solicitada para descer (houve mudança no sentido do movimento).

Histerese

Propriedade de um elemento que é evidenciada pelo valor da saída para uma excursão da entrada, em consequência da direção da excursão da entrada. Em outras palavras a trajetória da saída do sistema para uma determinada excursão da entrada é diferente quando essa entrada é crescente ou decrescente.

Dead Band (banda morta)

Faixa de valores em que um sinal de entrada pode ser variado, com reversão de direção, sem iniciar uma mudança observável no sinal de saída. É expresso em porcentagem da largura do sinal de entrada. A banda morta possui relações distintas e separadas de entrada-saída para sinais crescentes e decrescentes.

Dead Zone (zona morta)

Faixa pré-determinada da entrada na qual a saída permanece inalterada, independente da mudança de direção do sinal de entrada. Portanto, existe somente uma relação de entrada-saída, independentemente se os sinais forem crescentes ou decrescentes.

Saturação

Em malhas de controle que possuem válvulas é interessante utilizar um “bloco” saturação em sua entrada, justamente para o caso de o controlador requerer mais ação do que o atuador é capaz de disponibilizar. Esse tipo de característica pode levar o processo a atingir restrições.

Agarramento

Baseados nas definições da ANSI para histerese, dead band, dead zone e backlash, os autores Choudhury et al. (2008) definiram uma proposta para a definição do agarramento, como segue:

Propriedade de um elemento de tal forma que sua movimentação suave, em resposta a uma entrada variável, seja precedida por uma parte estática (banda morta mais banda de agarramento) seguida por um salto abrupto repentino, chamado *slip-jump*. O *slip-jump* é expresso como uma porcentagem da faixa de saída. Sua origem em um sistema mecânico é o atrito estático, o qual excede o atrito dinâmico (CHOUDHURY et al., 2008, p. 233).

O agarramento pode ocasionar oscilações em forma periódica, conhecido como ciclos limites. A variabilidade faz com que as variáveis do processo extrapolem seus limites de operação, segurança e eficiência. Desta forma, há um consumo excessivo de energia, o produto não obedece às especificações estabelecidas, podem acontecer paradas na operação do processo e não se chegar a um ponto ótimo de rentabilidade.

A correta manutenção dos equipamentos é a melhor atitude a ser tomada, mas segundo Srinivasan e Rengaswamy (2005), as paradas programadas de uma planta acontecem tipicamente entre seis meses a três anos de operação. Sendo assim, há períodos em que uma válvula com problemas deve permanecer operando, o que afeta diretamente o consumo de energia e a qualidade do produto final. Embora não sejam abordadas, existem estratégias para compensação do agarramento que são bastante úteis nesses casos, pois podem minimizar esses problemas até que numa próxima parada programada a manutenção aconteça.

Para permitir a passagem da haste da válvula para dentro do seu corpo (ver Figura 4), existe um orifício no mesmo, normalmente na parte superior. Portanto, para impedir que o fluido do processo saia por esse orifício, são inseridos anéis de vedação, também chamados de gaxetas. Estes elementos estão em contato com a haste, gerando, portanto, atrito entre os dois (SILVA, 2013).

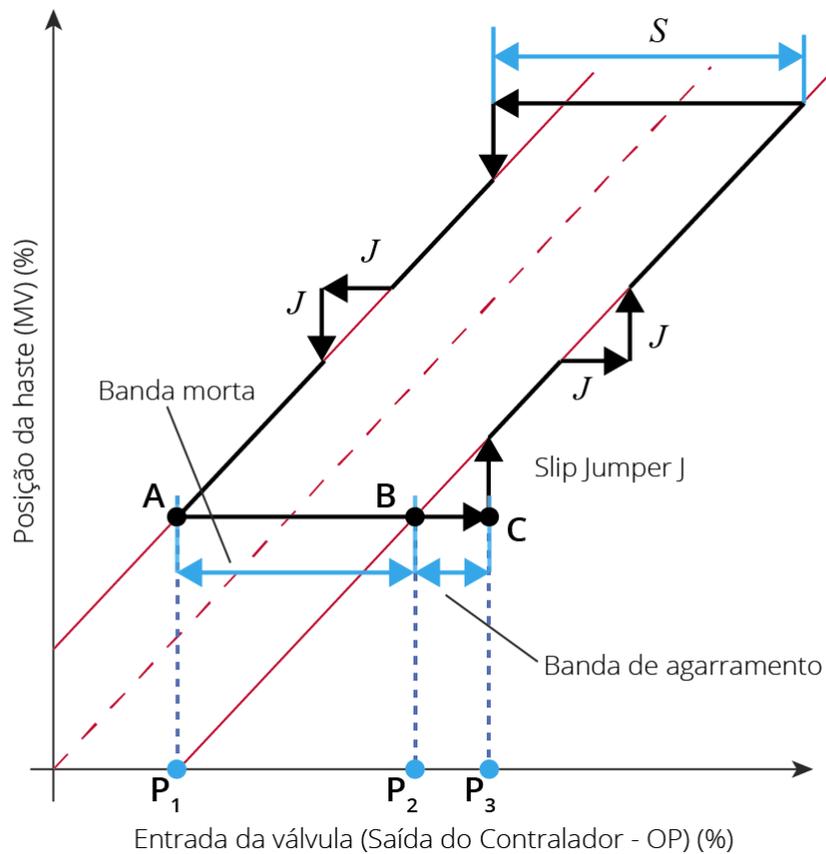
Assim, o atrito estático (*static friction*) é uma resistência ao início do movimento, normalmente medida como a diferença entre as forças necessárias para superar o atrito estático ao se inverter o sentido de movimento da haste da válvula. Dessa forma, uma característica marcante desta não linearidade é a ocorrência do *slip-jump*.

O atrito pode ser estático ou dinâmico. O atrito estático é a força que deverá ser superada para que seja iniciado um movimento relativo entre duas superfícies. Uma vez que a barreira do atrito estático seja vencida e que o movimento seja iniciado, o atrito dinâmico passa a atuar.

O fenômeno descrito (agarramento) pode ser melhor explicado pelo comportamento entrada-saída de uma válvula com agarramento ilustrado na Figura 7, conhecido como assinatura da válvula. Para se obter a curva de assinatura de uma válvula de controle é necessária a aplicação de sinais específicos (em malha aberta - apenas a válvula) ao seu atuador (na entrada da válvula) ou conversor I/P, tais sinais podem ser triangulares (mais comuns) ou trapezoidais. Com isso, plota-se a posição da haste (MV) em função do sinal de entrada aplicado. Note que para esse teste de obtenção da assinatura, a válvula deve possuir algum equipamento que disponibilize a posição atual/real (em cada instante) da haste.

Sem agarramento, a haste da válvula se move ao longo da linha traço-pontilhada passando pela origem. Qualquer valor de saída do controlador (OP) resultaria no mesmo valor de mudança da variável manipulada (posição da haste da válvula - MV). No entanto, para uma válvula que “agarra”, componentes de atrito estático e dinâmico devem ser levados em conta. O comportamento de entrada-saída pode ser descrito por quatro componentes: banda morta, banda de agarramento, salto do agarramento (*slip-jump* - J) e fase móvel.

Figura 07 - Curva de assinatura padrão de uma válvula sofrendo de agarramento.



Fonte: Adaptado de Cuadros et al. (2012).

Uma análise da Figura 7 foi retirada de Almeida (2015), como segue: considere que no ponto **A** a haste da válvula está parada e houve reversão no sentido de movimento, MV é constante com o tempo à medida que a válvula é presa pela presença da força de atrito estático (o sinal de controle aumenta sem que haja variação/movimento na posição da haste da válvula). A faixa de banda morta (**AB**) deve-se à presença do atrito de Coulomb, uma força constante que atua no sentido oposto ao do movimento. O ponto **BC** corresponde à banda de agarramento (J), e percebe-se que no ponto **C**, MV muda abruptamente (salto do agarramento - J), resultado do desbloqueio da válvula pela força externa aplicada e, logo após, MV varia gradualmente (fase de movimento) sendo que há apenas a oposição da força de atrito dinâmica. Quando a velocidade da haste da válvula está muito baixa a mesma volta a "agarrar", neste caso, não ocorrendo inversão no sentido de movimento só será preciso superar a banda de agarramento. A faixa formada pela banda morta mais a banda de agarramento será referenciada como **S**.

No caso de ocorrência de agarramento, a variável manipulada (MV) apresenta um comportamento temporal oscilatório. Devido ao pulso que o atuador da válvula (haste) precisa dar para vencê-lo. De acordo com Cuadros (2011), esta tendência do comportamento da variável manipulada é também propagada à variável de processo e é desta forma que o agarramento contribui com a variabilidade do processo e, conseqüentemente, com a perda de desempenho da malha de controle.

Nota: A causa das oscilações na saída do processo é efeito do *slip-jump*, apenas com a presença da banda morta na válvula de controle o próprio controlador do processo é capaz de compensar essa não linearidade.



Vídeo 04 - Conhecendo as Aplicações de Controle de Vazão

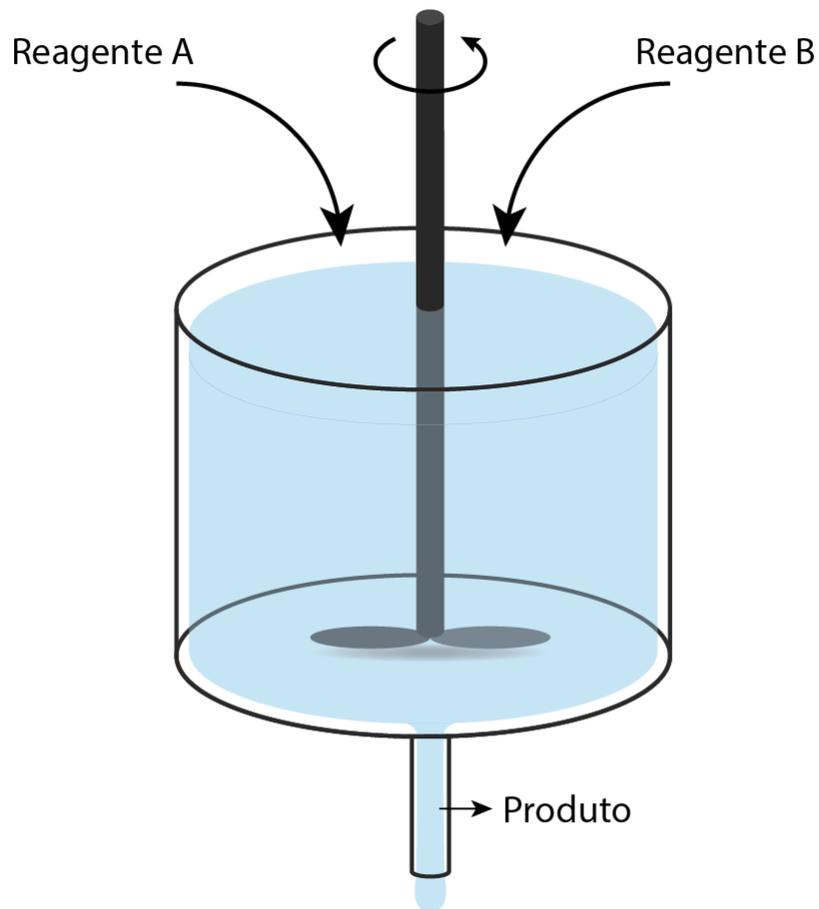
Atividade 02

1. Para complementar o estudo das válvulas de controle é interessante fazer uma pesquisa sobre Coeficiente de Vazão (CV) e características de vazão das válvulas.

Controle de Vazão

É bastante comum, em plantas que empregam controle de vazão, controlar a razão entre duas vazões. Essa estratégia é conhecida como **controle de razão**. Considere o seguinte exemplo de um reator retirado de Yoneyama (2003), mostrado na Figura 8.

Figura 08 - Reator simples.



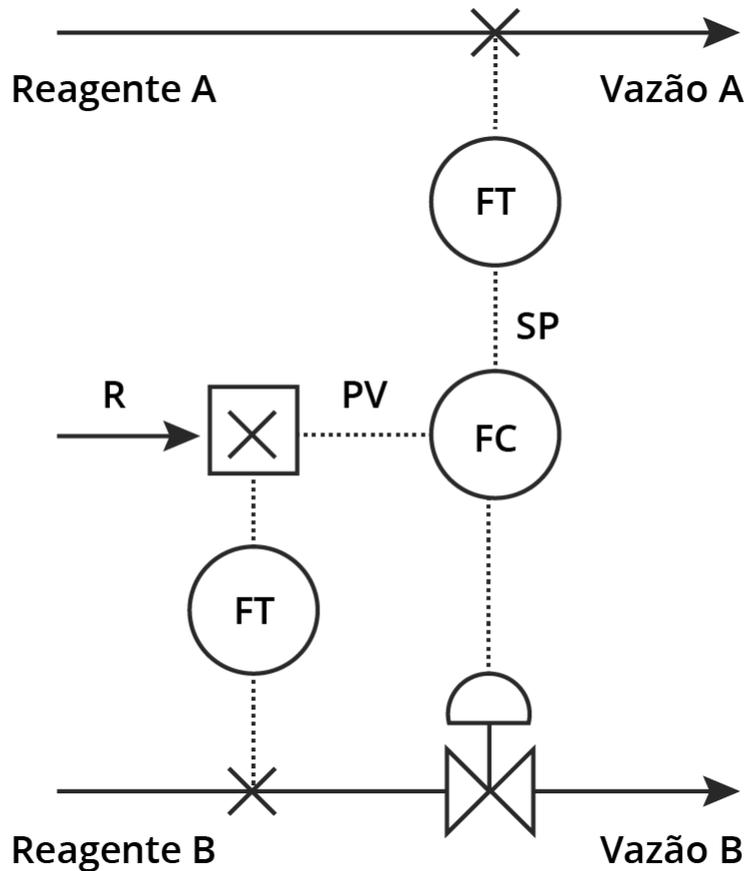
Fonte: : Yoneyama (2003). Disponível em <<http://www.ele.ita.br/~takashi/ratiocon.pdf>> Acesso em: 09 ago. 2013.

A ideia nesse tipo de processo é manter as concentrações fixas, o que pode ser obtido através das relações das vazões de entrada dos dois reagentes. Essa razão é dada por:

$$\frac{v_A}{v_B} = R$$

Em que v_A é a vazão do reagente A e v_B é a vazão do reagente B. Um esquema de controle que usualmente implementa o controle de razão é considerar o set point do controlador para a vazão de B e para a vazão de A e o sinal de realimentação da vazão de B multiplicado por R. A malha de controle de razão é mostrada na Figura 9.

Figura 09 - Malha de controle de razão.



Fonte: Yoneyama (2003). Disponível em <http://www.ele.ita.br/~takashi/ratiocon.pdf>. Acesso em: 09 ago. 2013.

Atividade 03

1. Apresente, em diagrama de blocos, a malha de controle da Figura 9.

Resultados Experimentais

Esta seção apresenta os resultados experimentais obtidos em uma planta didática da SMAR, que pertence ao Laboratório de Automação em Petróleo (LAUT) da UFRN.

Ambiente Experimental

Para a realização dos testes práticos foi utilizada uma planta didática da SMAR, apresentada na Figura 10. Essa planta possui um controlador multi loop, o CD600, que tem capacidade de controlar simultaneamente 4 loops (simples ou cascata) com mais de 8 PIDs (4 com controle avançados) e com mais de 120 blocos avançados de controle que se comunicam com os instrumentos de medição e atuação através do protocolo HART (*Highway Addressable Remote Transducer*). No que se refere à comunicação entre o computador e a planta didática (CD600), o sistema responde pelo protocolo aberto OPC (*OLE for Process Control*), onde via *software Matlab/Simulink(R)* da *Mathworks* é possível implementar os algoritmos de controle.

O protocolo de comunicação HART é um padrão de comunicação industrial que trabalha com instrumentos microprocessados os quais possuem sinais de corrente entre 4-20 mA. Esses sinais são largamente utilizados como forma de transmitir uma informação do processo para um elemento de controle, como um computador, por exemplo.

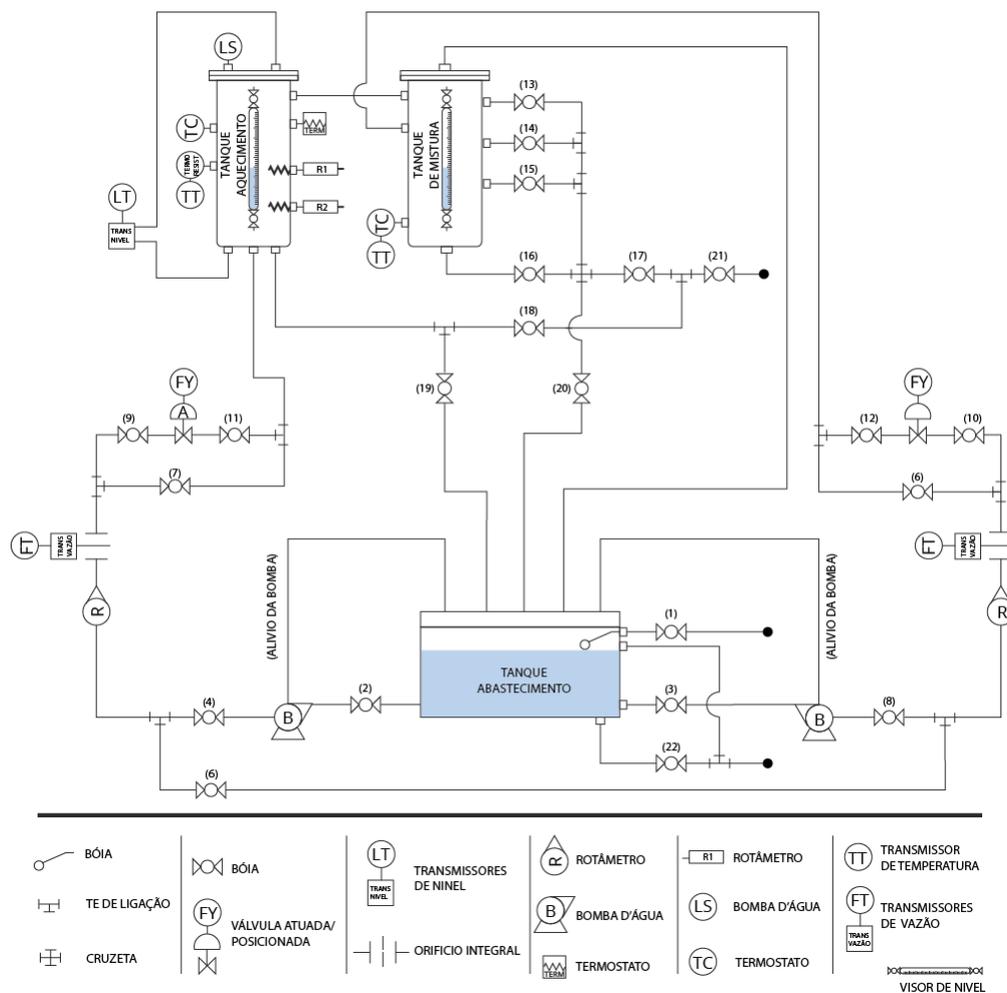
Figura 10 - Planta Didática da SMAR.



Fonte: Almeida (2015).

O objetivo da planta é demonstrar didaticamente a operação das diversas malhas de controle utilizando os mesmos equipamentos e ferramentas de configuração, em software, desenvolvidos para aplicação em controle industrial. O esquema da Figura 11 representa a instrumentação da planta, mostrando os principais componentes que a constituem e os caminhos físicos para o fluido do processo.

Figura 11 - Diagrama P&ID da planta didática da SMAR.



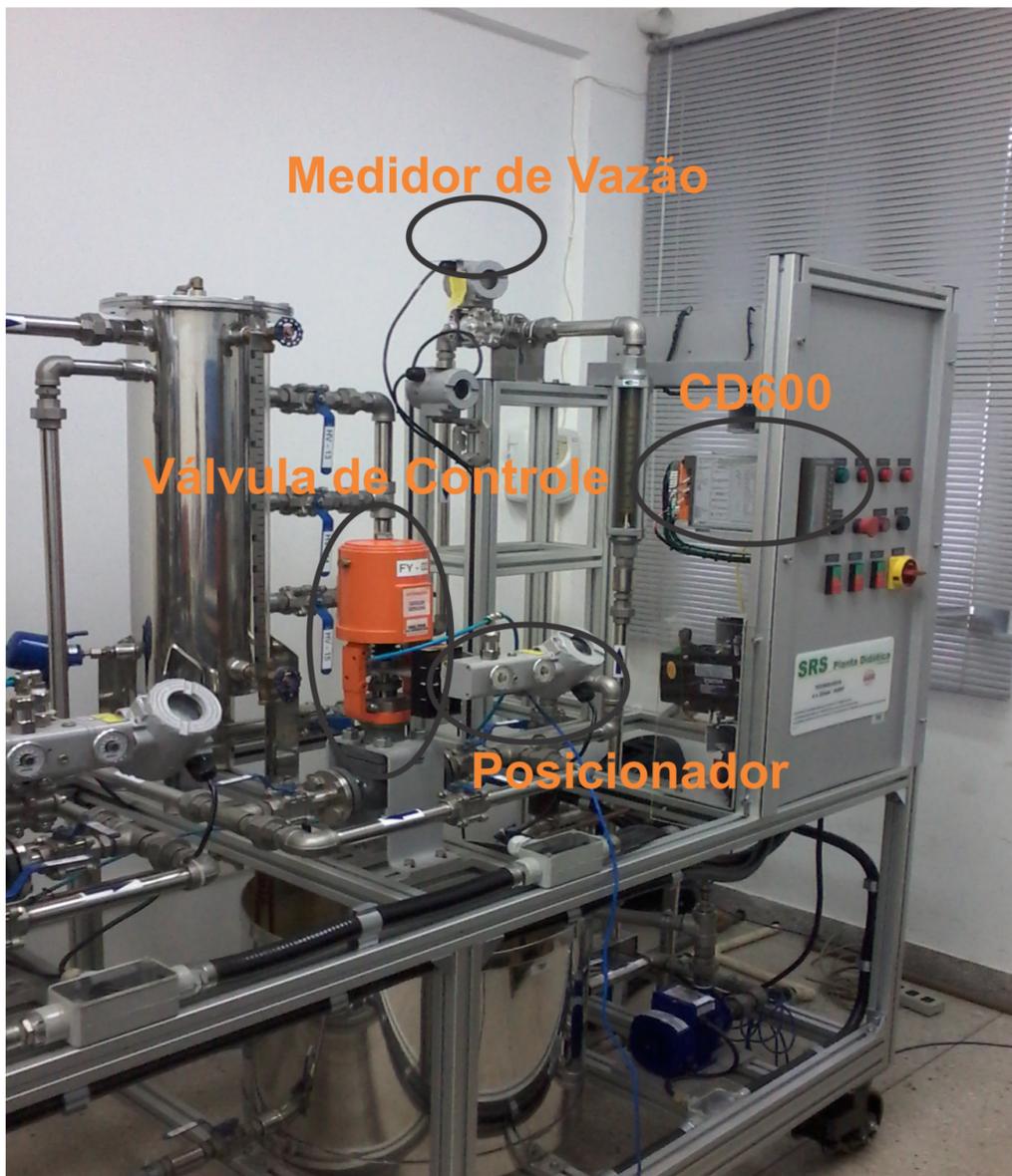
Fonte: Almeida (2015).

O funcionamento consiste basicamente na circulação de líquido em tanques, podendo existir estratégias diferentes de atuação sobre esse líquido. Como visto, existe um tanque de abastecimento responsável por armazenar o fluido a ser usado no processo. Nesse tanque central não existe nenhum controle nem automatismo. Para ser transportado, o fluido pode ser retirado por duas bombas, sendo que uma o destina para o tanque de aquecimento e a outra para o tanque de mistura. Na entrada de cada um desses tanques possui uma válvula controladora equipada com um posicionador, que controla a vazão de saída, sendo comandada pelo sinal analógico de 4-20 mA proveniente do CD600, além de válvulas de operação manual. Ao longo das tubulações e nos tanques, existem alguns transdutores que são utilizados para mensurar as grandezas físicas, como: vazão, nível e temperatura. Ao final, o fluido retorna para o tanque de abastecimento.

Malha de Vazão

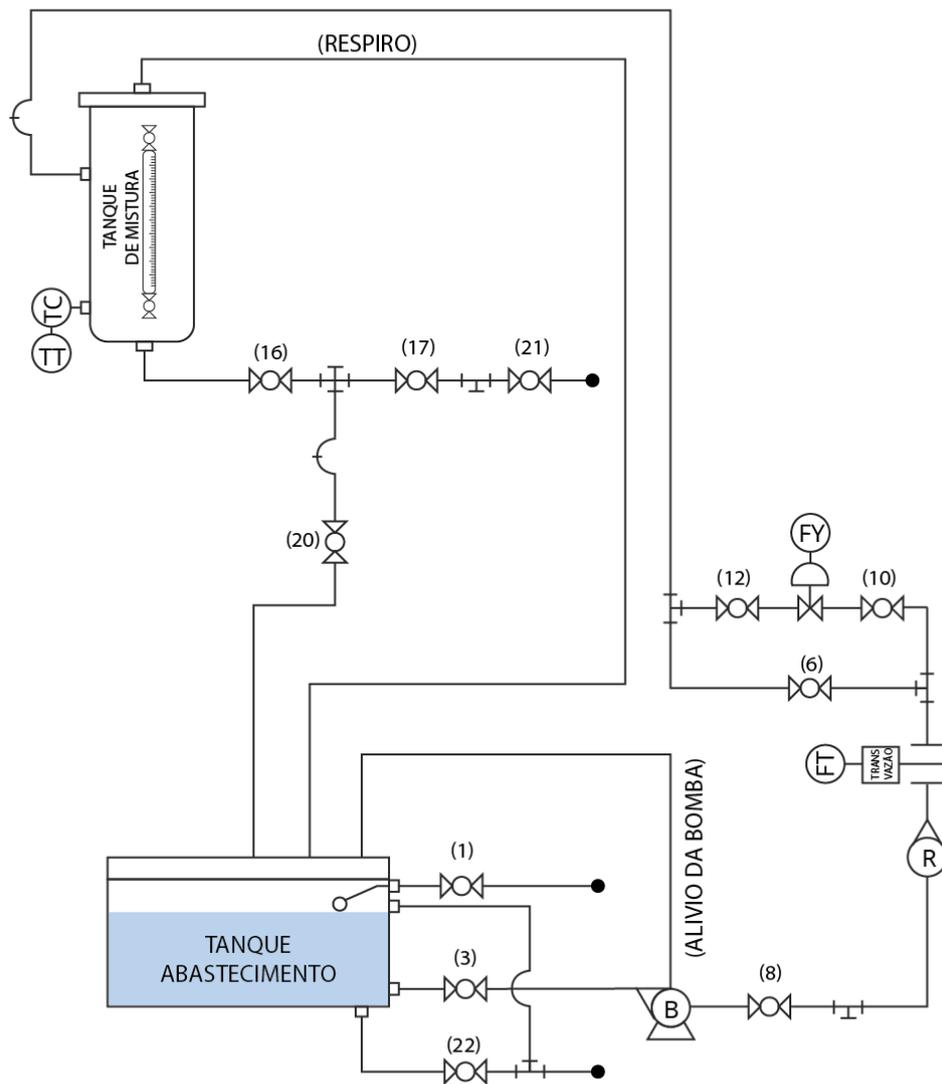
Os experimentos se destinam ao controle de vazão, desta forma, foi feita uma configuração na planta com as válvulas manuais, de modo que o líquido circulasse apenas por uma parte da tubulação, sendo possível sua medição e controle. Para o controle em malha fechada de vazão, foi utilizado um controlador PI. Como será visto mais adiante, esse processo é um pouco ruidoso, devido também à atuação da válvula. Nas Figuras 12 e 13 estão apresentados os principais componentes da planta utilizados para o controle da malha de vazão e o seu fluxograma, respectivamente.

Figura 12 - Principais componentes utilizados para o controle da malha de vazão.



Fonte: Almeida (2015).

Figura 13 - Fluxograma da malha de vazão.



Fonte: Almeida (2015).

Medidor de Vazão, Válvula de Controle, Posicionador e Sensor HALL

A medição da vazão da planta didática é feita pelo LD301 (SMAR), instrumento transmissor de pressão que possui um algoritmo de controle PID incorporado e suporte à tecnologia HART. Esse transmissor foi projetado para o uso em controle de processos industriais, sendo bastante robusto. Ele é capaz de medir pressão diferencial, absoluta, manométrica, nível e vazão, de fluidos de processos que trabalham com líquidos, gases ou vapores. Possui um display que mostra a variável

medida, no caso a vazão do processo. O sensor utilizado por esse transmissor para medir pressão é do tipo célula capacitiva, que é constituído por dois capacitores de valores variáveis.

O LD301 pode ser configurado para operar no modo transmissor ou modo controlador. No primeiro modo, o equipamento gera um sinal de corrente de acordo com o nível medido. Já no segundo modo, ele é capaz de controlar a corrente de saída para manipular o atuador, obedecendo a uma determinada lei de controle. Neste trabalho o LD301 está configurado para o modo transmissor.

A Figura 14 apresenta o conjunto da válvula de controle, posicionador e sensor de efeito HALL.

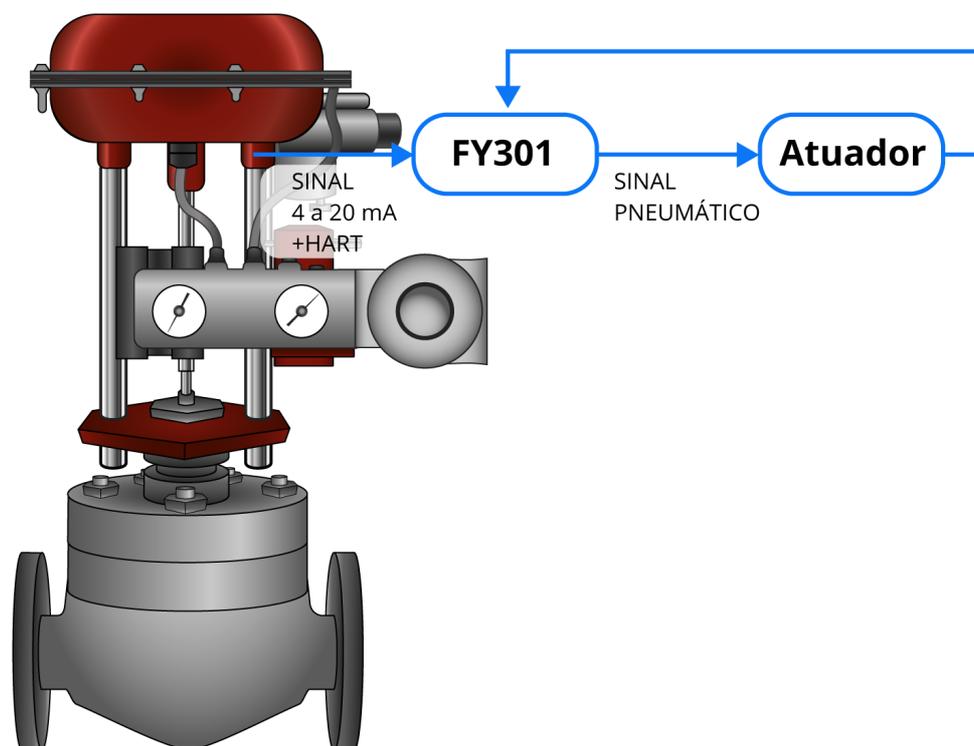
Figura 14 - controle_processo_a07_f14_a.png



A válvula de controle da Valtek Sulamericana é do tipo globo, com sede simples, que é responsável pelo controle do fluxo de água na malha. O corpo da válvula possui um diâmetro de 0.5", gaxetas de teflon, característica de vazão de igual porcentagem. Possui atuador do tipo multimola e tamanho diafragma 6, com uma excursão completa da haste de 3/4". A válvula em uso é do tipo ar para abrir, caso ocorra uma pane no sistema, por exemplo, a falta de suprimento de ar na tubulação pneumática, a válvula se fecha.

O posicionador de válvulas é o FY301 (SMAR) em sistema HART, para válvulas de controle pneumáticas linear de ação simples ou dupla e válvulas de controle rotativo. Possui medidores de pressão dentro das câmaras internas. São instrumentos microprocessados que convertem sinais de corrente para posição. Posiciona de 0% a 100% a válvula, ou seja, produz a pressão de saída requerida para posicionamento de acordo com a corrente de 4-20 mA recebida do instrumento de controle. Na Figura 15 é apresentado o diagrama de blocos do posicionador atuando no controle de posição da haste da válvula.

Figura 15 - Diagrama de blocos do posicionador atuando no controle de posição da haste da válvula de controle.



Na malha de controle a qual estamos estudando (planta didática da SMAR), não existe um conversor I/P, aqui o posicionador é o instrumento responsável por ajustar a pressão para alimentação da válvula de controle.

O FY301 permite a configuração de vários parâmetros, como tempo de abertura, tempo de fechamento, linearização do set point da válvula, parâmetros PI (proporcional e integral) e outros. Existem, também, os parâmetros avançados que podem determinar, por exemplo, se o ar comprimido é para abrir ou fechar a válvula (princípio de funcionamento pneumático). Isso permite a obtenção de várias curvas

de resposta, de acordo com as necessidades do projeto. A característica de vazão da válvula de controle é do tipo igual porcentagem, porém foi configurado no posicionador uma característica de vazão linear.

Para o funcionamento adequado, o fabricante recomenda ar comprimido seco, limpo, não corrosivo e com pressão entre 1,4 Bar (20 Psi) a 7 Bar (100 Psi), respeitando as normas de qualidade do ar para a instrumentação. O posicionador não necessita de fonte externa para alimentação. A própria corrente de 4-20 mA da linha de transmissão HART (a dois fios) é encarregada de alimentá-lo.

O sensor HALL determina a posição atual do atuador e faz a realimentação para o controle, sem contato mecânico. Não existe contato entre a válvula e o sensor de posição. O sensor de efeito HALL detecta mudanças no fluxo magnético através da movimentação dos ímãs que estão montados no eixo da válvula, fornecendo, assim, um sinal proporcional da posição real. Como não existe nenhum contato entre o ímã e o sensor de posição, o posicionador não é afetado pela vibração.

Identificação do Processo e Sintonia do Controlador PI

O que será abordado a seguir em grande parte já foi estudado em aulas anteriores, portanto servirá como uma forma de revisão e aplicação.

A identificação de sistemas tem por objetivo construir modelos de processos dinâmicos a partir de dados experimentais observados na planta. Esses modelos são do tipo “caixa-preta”, pois só se está interessado nas relações entre as entradas e saídas do processo, e não nos mecanismos internos do mesmo.

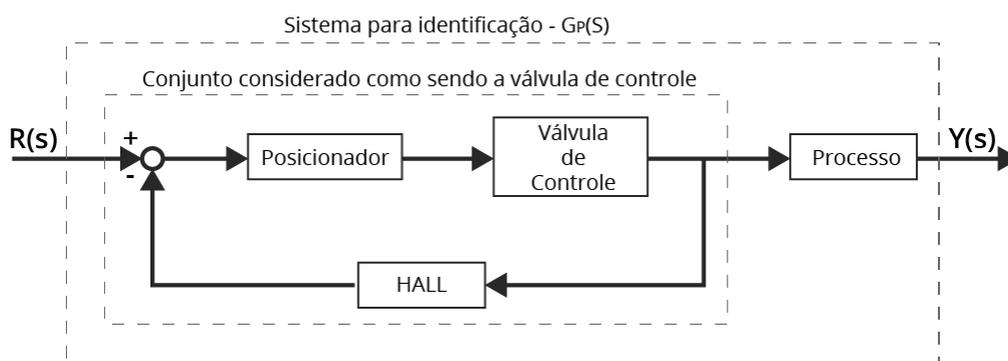
A vantagem destes modelos em sistemas complexos é que esse pode ser o método mais rápido e prático de se obter um modelo da dinâmica do processo. A desvantagem é que esse modelo tem uma validade apenas local, isto é, em torno do ponto de operação, não permitindo grandes extrapolações.

Vimos que em muitos trabalhos, na prática, tenta-se modelar a dinâmica do processo como sendo um tempo morto (θ), definido como o tempo a partir do instante em que o processo foi perturbado com um degrau, em que a sua variável

de saída, por exemplo a vazão, começa a variar ou sair do seu regime permanente, mais um modelo de primeira ordem [ganho (K) mais constante de tempo (τ)]. Esse modelo é um dos mais utilizados na prática para representar a dinâmica do processo e servir de base para a sintonia dos controladores do tipo PID.

Como o posicionador da válvula de controle possui um controlador PI, este serve para “assegurar” a posição da haste da válvula de acordo com o sinal de controle pretendido/comandado. Procurou-se inicialmente uma forma de desabilitar essa ação de controle na tentativa de utilizar o posicionador apenas para o fornecimento da posição, no entanto, não é possível desabilitá-lo. Desta forma, para a identificação do processo de vazão foi utilizada a estrutura do diagrama de blocos da Figura 16 (o ideal seria identificar o processo de vazão sem a influência do posicionador).

Figura 16 - Diagrama de blocos do sistema em malha aberta para identificação.



Na Figura 16, $R(s)$ representa a referência (degrau) que é gerada pelo controlador CD600 estando em modo manual, $Y(s)$ representa a vazão de saída quando aplicado o degrau e o bloco Processo equivale ao medidor de vazão.

Para obter os parâmetros que representam a dinâmica do processo (K , τ e θ) pode-se utilizar uma metodologia de identificação, que consiste no seguinte (CAMPOS; TEIXEIRA, 2010):

Introduzir perturbações iniciais (em malha aberta) em degrau no sinal de controle (U) de forma a garantir o condicionamento do sistema (verificar bandas mortas, histereses, etc.), isto é, efetuar ciclos de degraus para cima e para baixo.

Esperar para que o sistema atinja o regime permanente estável (variável controlada constante) e que não esteja sendo perturbado por alguma outra variável (no caso de sistemas multivariáveis).

Introduzir um degrau na variável de controle e obter a resposta do processo. Essa resposta do processo é conhecida na prática como “curva de reação” da planta. A partir dessa curva pode-se calcular os parâmetros do modelo do processo (Ex. ganho, constante de tempo e tempo morto).

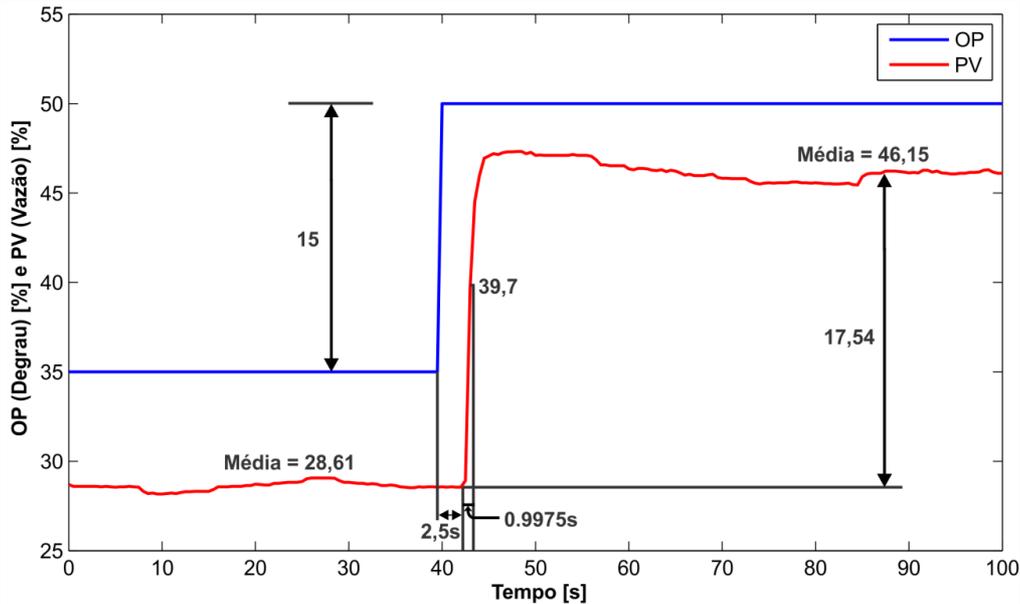
- O ganho do processo (K) em unidades de engenharia é calculado dividindo-se a variação da variável controlada em regime permanente pela variação da variável de controle, conforme a equação abaixo.

$$K = \frac{\Delta V}{\Delta U} = \frac{V_2 - V_1}{U_2 - U_1}$$

onde ΔV e ΔU são a variação da vazão e do sinal de controle, respectivamente (Ver a Figura 17). As constantes serão estimadas a partir da resposta do sistema a um degrau variando de 35% a 50% no sinal de controle.

- A constante de tempo (τ) é o tempo a partir do início da perturbação na variável de controle, descontado o tempo morto, em que a variável controlada já atingiu 63,2% (algumas vezes arredondado para 63%) da variação total até o novo regime permanente. Logo é o tempo para atingir: $0.632 \times \Delta V = 0.632 \times (V_2 - V_1)$.
- O tempo morto (θ) é o tempo a partir do início da perturbação na variável de controle em que a variável controlada começa a responder. Esse tempo também é conhecido como tempo de transporte, pois estaria associado ao tempo que a perturbação necessita para “transitar” dentro do processo e começar a afetar a variável controlada.

Figura 17 - Teste para obter o modelo da dinâmica do processo.



Na Figura 17 foi feita uma média dos valores em regime permanente em que se encontrava a vazão, pois mesmo não havendo variação no sinal de controle, a vazão continua oscilando em torno de um ponto fixo, isso é resultado da influência dos ruídos de medição e por outras condições do ambiente em que se encontrava a planta didática durante os experimentos.

A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros para o modelo da dinâmica do sistema, considerando entrada e saída em porcentagem da variação máxima.

Parâmetro	Valor
K	1.1693
t	0.9975
Θ	2.5

Tabela 1 - Parâmetros identificados do modelo de primeira ordem com tempo morto.

Para sintonia do controlador PI, foi utilizado o Método CHR como descrito em Campos e Teixeira (2010). A Tabela 2 mostra as sintonias propostas pelo método CHR para o critério de desempenho **“a resposta mais rápida sem sobrevalor”**,

sendo que o problema de controle é "servo" (mudança em degrau no *set point*).

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{0.3*\tau}{K*\Theta}$	∞	0
PI	$\frac{0.35*\tau}{K*\Theta}$	$1.16 * \tau$	0
PID	$\frac{0.6*\tau}{K*\tau}$	t	$\frac{\Theta}{2}$

Tabela 2 - Sintonia pelo método CHR (Critério: sem sobrevalor - Problema Servo).

Foi obtida uma primeira sintonia para o controlador PI de vazão utilizando a Tabela 2, porém, através de alguns testes foi possível obter um melhor ajuste dos parâmetros analisando a resposta do sistema. Na Tabela 3 os parâmetros do controlador PI de vazão sintonizados.

Parâmetro	Valor
K_p	0.16
T_i	1.14

Tabela 3 - Parâmetros do controlador PI de vazão sintonizados.

Atividade 04

1. Para fixar o aprendizado calcule os parâmetros do controlador PI de vazão a partir das Tabelas 1 e 2. Compare quantitativamente e qualitativamente a mudança ou a diferença entre os parâmetros calculados e os ajustados.

Controle da malha de Vazão

A medida da posição atual da haste da válvula bem como a configuração do posicionador FY301 se dão por meio de um software proprietário dedicado da SMAR, o CONF401 e um equipamento utilizado como interface de comunicação entre um instrumento que trabalha com o protocolo HART (escravo) e um Desktop/Laptop (mestre), através da porta de comunicação USB, o HI321.

Para uma boa análise da malha de controle, é importante possuir alguma informação sobre o grau de atrito da válvula de controle, e como foi visto, uma maneira prática de obter isso é com a curva de assinatura da válvula. Assim, caso existam, é possível identificar os parâmetros S e J que representam a banda morta e o salto da haste da válvula devido ao agarramento, respectivamente.

O teste para obtenção da assinatura foi feito conforme a Figura 18, consistindo na aplicação de um sinal triangular (OP) com no mínimo três ciclos completos, variando de 0% a 100% com rampas de subida e descida de 20 segundos, para que seja possível garantir a excursão completa da haste da válvula de controle. A Figura 19 apresenta a assinatura da válvula, consistindo aqui na relação entre a referência em onda triangular e a posição da haste da válvula.

Figura 18 - Diagrama de blocos do modelo posicionador com válvula para obtenção da assinatura.

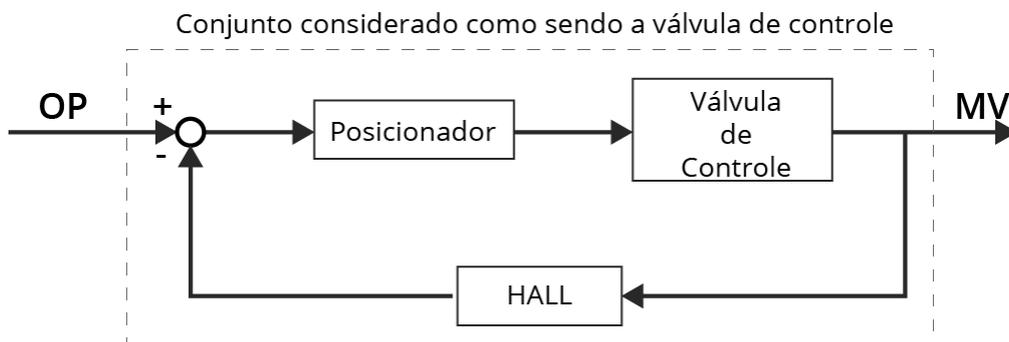
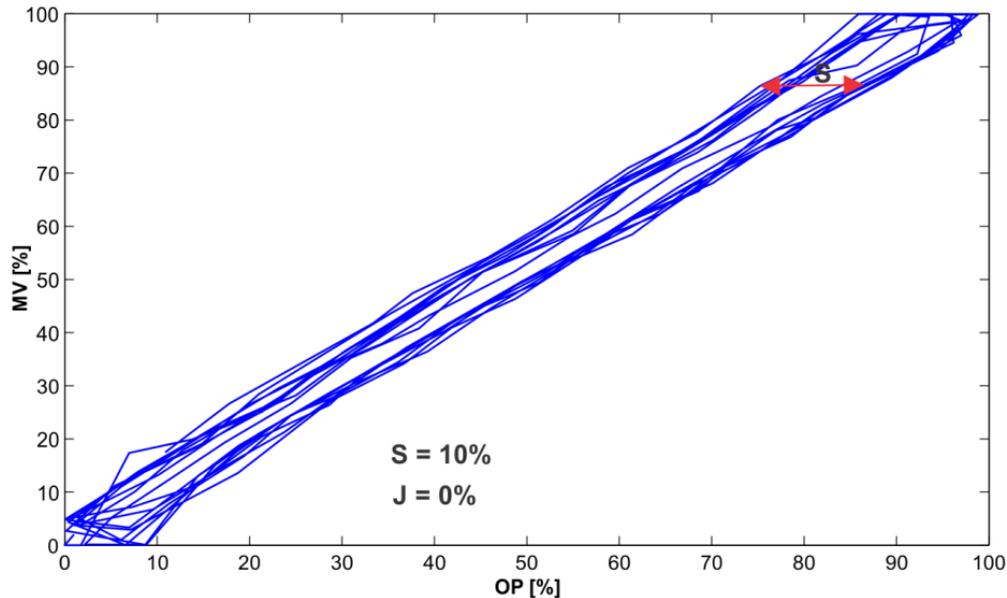


Figura 19 - Assinatura da válvula de controle.



Uma breve análise da Figura 19, mostra que não é possível identificar o salto da haste da válvula (J) pela curva de assinatura, apenas o parâmetro S. Isso indica que a válvula está em um bom estado de conservação, fato da válvula ser nova. Embora os posicionadores não solucionem completamente os problemas que são gerados pelo agarramento, de certa forma minimizam seus efeitos. No entanto, podemos analisar o efeito da banda morta no desempenho do controle da malha de vazão.

A arquitetura de rede para o controle da malha de vazão na planta didática consiste basicamente em um computador que se comunica com o CD600 da SMAR, através da comunicação OPC, e para comunicação do CD600 com o medidor de vazão é usado o sinal de 4-20 mA + HART.

O software *Matlab/Simulink(R)* possui uma toolbox chamada OPC, a qual permite que se conecte esse ao servidor OPC da planta HART. O Simulink tem a facilidade de já possuir os blocos funcionais da interface OPC, bastando somente que seja configurado para utilizá-lo na comunicação. Nesta aplicação foram utilizados três blocos do OPC toolbox:

Figura 20 - Diagrama de blocos do sistema em malha fechada para o controle de vazão.

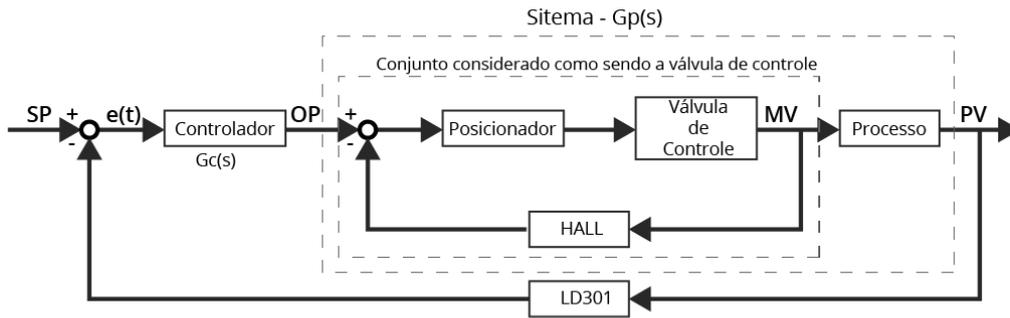
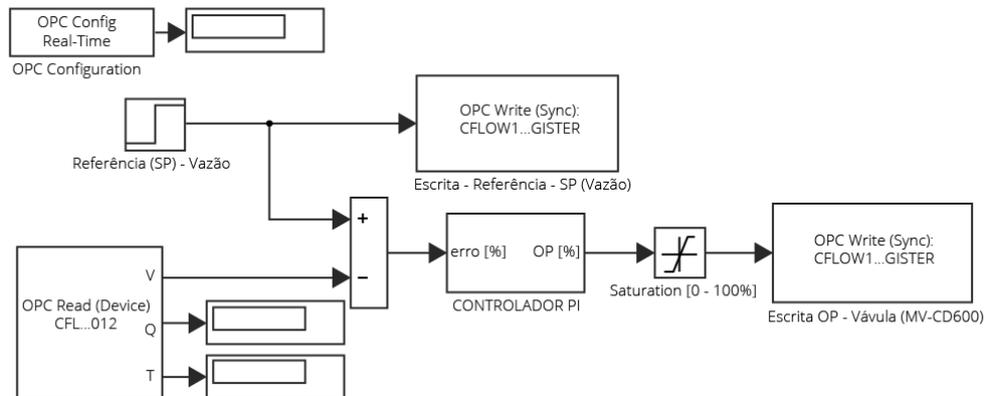


Figura 21 - Diagrama de blocos do sistema em malha fechada representado no Simulink.



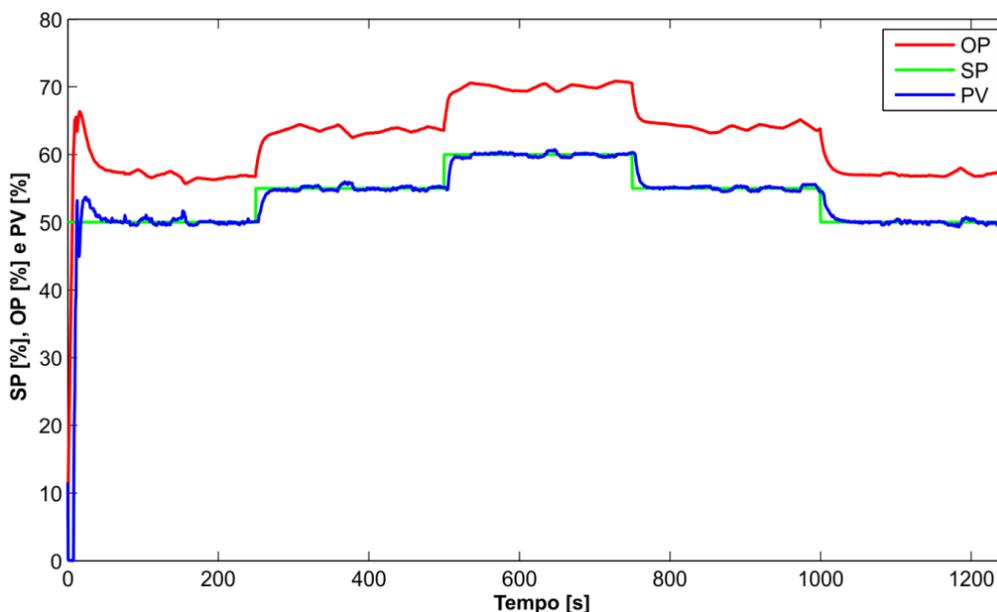
De acordo com a Figura 21, o bloco OPC Read se comunica com o controlador CD600 da planta para ler o valor atualizado da vazão (PV), que é a informação do sensor LD301, em seguida o compara com a referência (SP), fornecida a priori e gera um sinal de erro. O sinal de erro é transmitido para o bloco do controlador PI gerando um sinal de controle que é enviado para o CD600 através do bloco OPC Write que escreve o valor de abertura da válvula (MV).

Ensaio para o Problema Servo

Os testes que foram realizados têm por objetivo avaliar a capacidade da malha de controle de vazão em seguir degraus no set point e ao mesmo tempo verificar se há oscilações em torno da referência devido ao atrito na válvula de controle (banda morta).

O set point do primeiro ensaio é uma sequência de degraus, sendo o primeiro de 50% seguido por dois degraus positivos de 5% e por dois negativos também de 5%. A duração do ensaio foi de 1250 segundos, divididos, igualmente, em intervalos de 250 segundos para cada patamar. A Figura 22 apresenta os resultados para o ensaio, que consiste em uma trajetória através de degraus cujo valor das referências foram, em ordem de aplicação, 50%, 55%, 60%, 55% e 50%.

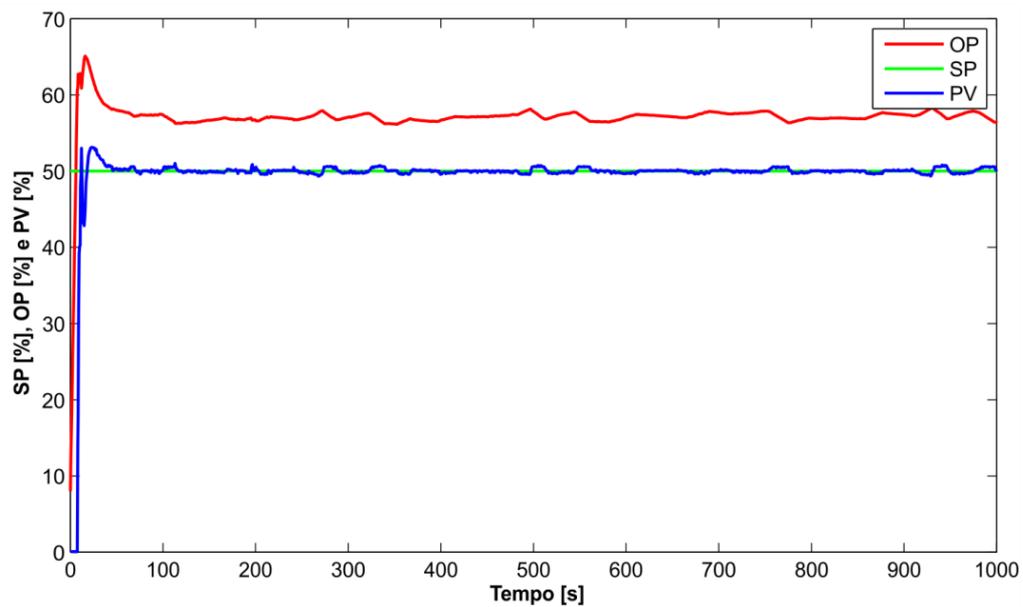
Figura 22 - Resultados obtidos no ensaio de acompanhamento de set point.



Pela Figura 22 é possível observar que a saída do processo (PV) não apresenta oscilações devido ao agarramento na válvula de controle, pelo fato de $J = 0$. Ocorrem apenas pequenas oscilações da vazão em torno da referência, supostamente geradas pela maior parte por ruídos de medição, visto que uma característica da válvula com agarramento é induzir na variável de processo um padrão de oscilação, gerando um ciclo limite (oscilações em forma periódica). Mesmo com a presença da banda morta (S), o próprio controlador do processo foi capaz de compensar essa não linearidade dentro das regiões de operação do experimento.

Para poder comprovar que a válvula de controle não gera oscilações devido ao agarramento, foi feito um segundo teste, sendo aplicado um degrau de 50% na vazão e mantendo-a nessa referência por um maior tempo (1000 segundos). A Figura 23 mostra o resultado para esse teste.

Figura 23 - Resultado obtido no ensaio de acompanhamento de set point para uma referência de 50% da vazão.



Novamente não foi possível identificar um padrão de oscilações, sendo que ocorrem apenas pequenas variações da vazão em torno da referência em intervalos não regulares, fato que pode ser causado pelos próprios equipamentos e instrumentos da planta.

A válvula de controle utilizada por ser equipada com um posicionador e estando em bom estado, apresenta um agarramento desprezível, não afetando com grande influência o desempenho da malha. Mesmo com a banda morta, não houve oscilações na variável de processo, portanto a malha de controle está com uma boa performance.

Resumo

Foi estudado um tipo de variável muito importante e comum no meio industrial: a vazão. Aprendemos sobre a principal técnica de se medir vazão (a placa de orifício) e sobre o principal atuador de vazão (a válvula). O controle de razão, muito comum em processos industriais, também foi apresentado. Nas aulas seguintes, estudaremos outras variáveis, também muito importantes na área de controle de processos.

Placa de Orifício é um dos sistemas mais usados na medição de vazão por diferencial de pressão. Sua aplicação na indústria é relativamente alta, devido a vantagens como simplicidade, baixo custo, baixos índices de manutenção e aplicações em diversos tipos de fluidos. É muito mais favorável que outros tipos de medidores de vazão sejam usados em larga escala por refinarias de petróleo, indústrias petroquímicas, siderúrgicas, açúcar, álcool e demais segmentos das indústrias de processo.

O uso de técnicas de compensação do agarramento pode diminuir a vida útil do equipamento (válvula de controle), pois com essas estratégias possa ser que haja um aumento na atuação da haste da válvula, ou seja, a mesma se movimentará com maior frequência, o que ocasionará o seu desgaste mais rapidamente. Porém, como benefício há uma redução da variabilidade na saída do processo (as oscilações diminuem), implicando em uma melhoria da malha de controle em relação a PV. Sendo assim, a equipe de controle de processos deve sempre procurar uma forma de compensar o agarramento (**antes deve ser constatado que a redução da eficiência na malha de controle estar sendo causada pelo agarramento na válvula e não por outro problema, como uma sintonia inadequada do controlador**) prejudicando ao mínimo a válvula de controle e, no entanto, com uma melhoria na PV. A título de curiosidade, existem diversos trabalhos nessa área e várias pesquisas vêm sendo feitas com esse objetivo.

Autoavaliação

1. O que significa medir a vazão de uma corrente de um processo através do diferencial de pressão?
2. Qual a relação que existe entre o diferencial de pressão de uma placa de orifício e a vazão na linha em que a mesma está instalada?
3. Explique, com suas palavras, o que significa controlar a razão entre as vazões de um determinado processo industrial.

Referências

ALMEIDA, Tiago Alves de. **Uma técnica de linearização por realimentação para compensação de agarramento em válvulas de controle pneumáticas.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2015.

ALMEIDA, T. A.; DOREA, Carlos E.T. Uma técnica de linearização por realimentação para compensação de agarramento em válvulas de controle pneumáticas. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES, 2015, Natal, **Anais...** Natal: DINCON, 2015, p. 1-7.

CAMPOS, Mario Cesar M. Massa de; TEIXEIRA, Herbert C. G. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

CHOUDHURY, M. A. A. S.; THORNHILL, N. F.; SHAH, S. L.; Modeling valve stiction. **Control Engineering Practice**, v. 13, p. 641-658, 2005.

CHOUDHURY, M. A. A. S.; THORNHILL, N. F.; SHAH, S. L.; Stiction - definition, modelling, detection and quantification. *Journal of process control*, v. 18, p. 232-243, 2008.

CONTROL valve handbook. **Iowa:** Fisher-Rosemount System, 1998. Disponível em:

<<http://www.documentation.emersonprocess.com/groups/public/documents/book/cvh99.pdf>>. Acesso em: 05 set. 2013.

CUADROS, M. A. de S. L. **Quantificação e compensação de atrito em válvulas de controle pneumáticas.** 2011. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2011.

CUADROS, Marco Antonio de S. L.; MUNARO, Celso José; MUNARETO, Saul. Um método simples para a quantificação do atrito em válvulas de controle pneumáticas. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 19, 2012, Campinha Grande. **Anais...** Campina Grande: CBA, 2012. p. 331-337.

GARCIA, C. **Modelagem e simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos.** São Paulo: EDUSP, 2013.

KAYIHAN, A.; DOYLE III, F. J. Friction compensation for a process control valve. **Control Engineering Practice**, v. 8, p. 799-812, 2000.

MISHRA, P.; KUMAR, V.; RANA, K. P. S. A novel intelligent controller for combating stiction in pneumatic control valves. **Control Engineering Practice**, v. 33, p. 94-104, 2014.

PAIOLA, C. E. G. **Técnicas intrusivas de detecção de atrito em válvulas de controle.** 2008. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SILVA, B. C. **Avaliação da eficiência de compensadores de atrito aplicados a válvulas de controle.** 2013. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SRINIVASAN, R.; RENGASWAMY, R. Stiction compensation in process control loops: a framework for integrating stiction measure and compensation. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 44, p. 9164-9174, 2005.

YONEYAMA, Takashi. **Controladores de razão.** 2003. Disponível em: <<http://www.ele.ita.br/~takashi/ratiocon.pdf>>. Acesso em: 09 ago. 2013.