

1. Variáveis de Processo

1.1. Introdução

A variável de processo é uma grandeza física que altera seu valor em função de outras variáveis e principalmente em relação ao tempo. O objetivo do controle de processo é o de manter uma variável constante ou, no mínimo, variando dentro de certos limites estabelecidos. Antes de ser controlada, uma variável deve ser medida, dentro de uma classe de precisão requerida pelo pessoal do processo. A partir da medição da variável, o operador de processo pode efetuar o controle manual, como aumentar uma pressão, diminuir uma temperatura, encher um tanque (nível) ou fechar uma válvula (vazão). Em sistema de controle automático, o sinal medido é contínua e automaticamente comparado com um valor de referência e este erro é usado como função de controle, sem a interferência do operador humano.

Em um processo industrial típico, mais de 90% das medições envolvem apenas quatro variáveis: pressão, temperatura, vazão e nível. As outras variáveis menos comuns incluem: posição, condutividade, densidade, análise, pH e vibração.

1.2. Conceito

Quantidade é qualquer coisa que possa ser expressa por um valor numérico e uma unidade de engenharia. Por exemplo,

massa é uma quantidade física expressa em kilogramas;
 velocidade é uma quantidade expressa em metros por segundo e
 densidade relativa é uma quantidade física adimensional.

O círculo *não* é uma quantidade física, pois é caracterizado por uma certa forma geométrica que não pode ser expressa por números. O círculo é uma figura geométrica. Porém, a sua área é uma quantidade física que pode ser expressa por um valor numérico (p. ex., π , 5) e uma unidade (p. ex., metro quadrado).

Muitas noções que antes eram consideradas somente sob o aspecto

qualitativo foram recentemente transferidas para a classe de quantidade, como eficiência, informação e probabilidade.

1.3. Dimensões

Dimensão é uma característica da quantidade que pode ser definida quantitativamente. Para descrever satisfatoriamente uma quantidade para um determinado objetivo, as dimensões de interesse devem ser identificadas e representadas numericamente. Cada dimensão é medida em unidades. A unidade tem um tamanho relativo e subdivisões que são diferentes entre os diversos sistemas de medição.

Pode-se somar ou subtrair somente quantidades de mesma dimensão, sendo a dimensão do resultado igual à dimensão das parcelas. Pode-se multiplicar ou dividir quantidades de quaisquer dimensões e a dimensão do resultado é o produto ou divisão das parcelas envolvidas.

É possível se ter quantidades adimensionais, definidas como a divisão ou relação de duas quantidades com mesma dimensão; o resultado é sem dimensão ou adimensional. Uma quantidade adimensional é caracterizada por seu valor numérico. Exemplo de quantidade adimensional é a densidade relativa, definida como a divisão da densidade de um fluido pela densidade da água (líquidos) ou do ar (gases).

O valor numérico da quantidade, associado à unidade é também adimensional. Em matemática as quantidades geralmente são tomadas sem dimensão.

2. Tipos das Quantidades

As quantidades possuem características comuns que permitem agrupá-las em diferentes classes, sob diferentes aspectos.

Quanto aos valores assumidos, as quantidades podem ser variáveis ou constantes, contínuas ou discretas.

Sob o ponto de vista termodinâmico, as variáveis podem ser intensivas ou extensivas, ou podem ser variáveis de quantidade ou de qualidade.

Com relação ao fluxo de energia manipulada, as variáveis podem ser pervariáveis ou transvariáveis.

Sob o ponto de vista de função, as variáveis podem ser independentes ou dependentes.

Obviamente, estas classificações se superpõem; por exemplo,

1. a temperatura é uma quantidade variável contínua de energia intensiva, transvariável;
2. a corrente elétrica é uma variável contínua de quantidade, extensiva e pervariável.

Para se medir corretamente uma quantidade é fundamental conhecer todas as suas características. A colocação e a ligação incorretas do medidor podem provocar grandes erros de medição e até danificar perigosamente o medidor.

Na elaboração de listas de quantidades do processo que impactam a qualidade do produto final é também necessário o conhecimento total das características da quantidade.

2.1. Energia e Propriedade

As variáveis de quantidade e de taxa de variação se relacionam diretamente com as massas e os volumes dos materiais armazenados ou transferidos no processo. As variáveis extensivas independem das propriedades das substâncias. Elas determinam a eficiência e a operação em si do processo. As variáveis de quantidade incluem volume, energia, vazão, nível, peso e velocidade de máquinas de processamento.

As variáveis de energia se relacionam com a energia contida no fluido ou no equipamento do processo. Elas podem determinar indiretamente as propriedades

finais do produto e podem estar relacionadas com a qualidade do produto. Elas deixam de ser importantes assim que os produtos são feitos. Elas independem da quantidade do produto e por isso são intensivas. As variáveis de energia incluem temperatura e pressão.

As variáveis das propriedades das substâncias são específicas e características das substâncias. Todas as grandezas *específicas* são intensivas. Por definição, o valor específico é o valor da variável por unidade de massa. Por exemplo, energia específica, calor específico e peso específico. As principais variáveis de propriedade são: a densidade, viscosidade, pH, condutividade elétrica ou térmica, calor específico, umidade absoluta ou relativa, conteúdo de água, composição química, explosividade, flamabilidade, cor, opacidade e turbidez.

2.2. Extensivas e Intensivas

O valor da variável extensiva depende da quantidade da substância. Quanto maior a quantidade da substância, maior é o valor da variável extensiva. Exemplos de variáveis extensivas: peso, massa, volume, área, energia.

O valor da variável intensiva independe da quantidade da substância. Em um sistema com volume finito, os valores intensivos podem variar de ponto a ponto. As variáveis de energia e das propriedades das substâncias são intensivas, porque independem da quantidade da substância. Exemplos de variáveis intensivas: pressão, temperatura, viscosidade e densidade.

2.3. Pervariáveis e Transvariáveis

Uma pervariável ou *variável através (through)* é aquela que percorre o elemento de um lado a outro. Uma pervariável pode ser medida ou especificada em um ponto no espaço. Exemplos: força, momento, corrente elétrica e carga elétrica.

Uma transvariável ou *variável entre dois pontos (across)* é aquela que existe entre dois pontos do elemento. Para medir ou especificar uma transvariável são necessários dois pontos no espaço,

usualmente um ponto é a referência. Exemplos: deslocamento, velocidade, temperatura e tensão elétrica.

Todos os objetos em um sistema dinâmico envolvem uma relação definida entre uma transvariável e uma pervariável. Por exemplo, o capacitor, resistor e indutor elétricos podem ser definidos em termos da relação entre a transvariável tensão e a pervariável corrente.

2.4. Variáveis e Constantes

A variável de processo é uma grandeza que altera seu valor em função de outras variáveis, sob observação ao longo de um tempo. Constante é aquela cujos valores permanecem inalterados durante o tempo de observação e dentro de certos limites de precisão.

Por exemplo, seja um tanque cheio de água. A pressão que a coluna de água exerce em diferentes pontos verticais é variável e depende da altura. Porém, ao mesmo tempo, a densidade da água pode ser considerada constante, com um determinado grau de precisão, em qualquer ponto do tanque. Diz-se, então, que a pressão da água é uma quantidade variável em função da altura líquida e a densidade da água é uma quantidade constante em função da altura líquida e do tempo.

Pode-se considerar incoerente chamar uma variável de constante. Porém, uma quantidade constante é um caso especial de uma quantidade variável. A constante é a variável que assume somente um valor fixo durante todo o tempo. Como, na prática, sempre há uma variabilidade natural em qualquer grandeza, deve-se estabelecer os limites de tolerância, dentro dos quais a grandeza se mantém constante.

Em instrumentação, raramente se mede continuamente uma constante. Como ela é constante, basta medi-la uma única vez e considerar este valor em cálculos ou compensações. Por exemplo, a diferença de altura do elemento sensor e do instrumento receptor influi na pressão exercida pela coluna líquida do tubo capilar. Esta altura é definida pelo projeto, mantida na instalação e considerada na calibração. Ela não é medida

continuamente, porém, quando há alteração de montagem, o novo valor da altura é considerado na calibração do instrumento.

O objetivo do controle de processo é o de manter constante uma variável ou deixá-la variar dentro de certos limites.

Parâmetro é uma quantidade constante em cada etapa da experiência, mas que assume valores diferentes em outras etapas. Deve-se escolher os parâmetros mais significativos entre as várias características do processo. Por exemplo, quando se faz uma experiência para estudar o comportamento da pressão de líquidos em um tanque, usando-se líquidos com densidades diferentes entre si, a densidade, constante para cada líquido e diferente entre os líquidos, é chamada de parâmetro.

2.5. Contínuas e Discretas

Variável contínua é aquela que assume todos os infinitos valores numéricos entre os seus valores mínimo e máximo. Na natureza, a maioria absoluta das variáveis é contínua; a natureza não dá saltos. Uma variável contínua é medida. Exemplo de uma variável contínua: a temperatura de um processo que varia continuamente entre 80 e 125 °C.

Variável discreta é aquela que assume somente certos valores separados. Na prática, as variáveis discretas estão associadas a eventos ou condições. Uma variável discreta é contada. Por exemplo, uma chave só pode estar ligada ou desligada. O número de peças fabricadas é um exemplo de variável discreta.

2.6. Mecânicas e Elétricas

As quantidades mecânicas são as derivadas do comprimento, massa, tempo e temperatura. São exemplos de quantidades mecânicas:

1. área e volume que dependem apenas do comprimento.
2. velocidade e aceleração que envolvem comprimento e tempo.
3. força, energia e potência que envolvem massa, comprimento e tempo

4. frequência que depende apenas do tempo.

A produção contínua de eletricidade se tornou realidade com a invenção da pilha por Volta, em 1800. A análise dos circuitos elétricos começou em 1827, quando George Simon Ohm descobriu a relação entre tensão, corrente e resistência. Nesta época as unidades destas grandezas ainda não eram estabelecidas. Os valores de corrente eram medidos com um arranjo de agulha, compasso e bobina. Os valores da tensão elétrica eram estabelecidos em termos de potencial de uma pilha voltaica específica. Os valores de resistência eram estabelecidos em termos da resistência de um comprimento particular de fio de ferro com um diâmetro específico.

Era evidente a necessidade de unidades no campo elétrico, relacionadas com as unidades mecânicas já estabelecidas, como comprimento massa e tempo. Em 1832, Karl Friedrich Gauss mediu a intensidade do campo magnético da terra em termos de comprimento, massa e tempo. Em 1849, Wilhelm Kohlraush mediu a resistência em termos destas unidades. Wilhelm Weber, em 1851, introduziu um sistema completo de unidades elétricas baseado em unidades mecânicas. Estes princípios de Weber formam a base do sistema atual de medições elétricas. Em 1861, a Associação Britânica para o Avanço da Ciência introduziu o ohm padrão, baseado no fio de liga platina e prata.

As unidades elétricas SI derivadas podem ser definidas em função de quantidades mecânicas.

O volt (V), unidade de diferença de potencial e força eletromotriz, é a diferença de potencial entre dois pontos de um fio condutor conduzindo uma corrente constante de 1 A, quando a potência dissipada entre estes pontos é igual a 1 W.

O ohm (Ω), unidade de resistência elétrica, é a resistência elétrica entre dois pontos de um condutor quando uma diferença de potencial constante de 1 V, aplicada a estes pontos, produz no condutor uma corrente de 1 A, o condutor não sendo fonte de qualquer força eletromotriz.

O coulomb (C), unidade de quantidade de eletricidade, é a quantidade de eletricidade transportada em 1 s por uma corrente de 1 A.

O farad (F), unidade de capacitância, é a capacitância entre as placas do capacitor onde aparece uma diferença de potencial de 1 V quando é carregado por uma quantidade de eletricidade de 1 C.

O henry (H), unidade de indutância elétrica, é a indutância de um circuito fechado em que uma força eletromotriz de 1 V é produzida quando a corrente elétrica varia uniformemente à taxa de 1 A/s.

O weber (Wb), unidade de fluxo magnético, é o fluxo que, ligando um circuito de uma volta produz nele uma força eletromotriz de 1 V se for reduzido a zero em uma taxa uniforme de 1 s.

O tesla (T) é a densidade de fluxo de 1 Wb/m².

As principais variáveis envolvidas na indústria de processo são quatro: temperatura (grandeza de base), pressão (mecânica), vazão volumétrica ou mássica (mecânica) e nível (mecânica). Em menor frequência, são também medidas a densidade (mecânica), viscosidade (mecânica) e composição (química). Porém, na instrumentação, são manipulados os sinais pneumático (mecânico) e eletrônico. Por causa da instrumentação eletrônica, as quantidades elétricas como tensão, resistência, capacitância e indutância se tornaram muito importantes, pois elas estão ligadas aos instrumentos eletrônicos de medição e controle de processo.

3. Faixa das Variáveis

3.1. Faixa e Amplitude de Faixa

O conjunto de todos os valores que podem ser assumidos pela variável é chamado de faixa da variável (*range*). A faixa da variável é expressa por dois números: limite inferior (0%) e limite superior (100%).

O intervalo finito, dado pela diferença algébrica dos dois limites, é chamado de amplitude de faixa da variável (*span*). A amplitude de faixa é expressa por um único número positivo.

Por exemplo, a faixa de temperatura de 15 a 30 °C tem amplitude de faixa de 15 °C; (30 - 15 °C = 15 °C). A faixa de -15 a 30 °C tem amplitude de faixa de 45 °C; [30 - (-15) °C = 45 °C].

A faixa de medição sempre vai de 0 a 100%, porém o 0% pode ser igual ou diferente de zero. A terminologia das faixas é a seguinte:

0 a 100 °C - faixa normal

10 a 100 °C - faixa com zero suprimido

-10 a 100 °C - faixa com zero elevado

O conceito de faixa com zero elevado ou suprimido é particularmente importante na calibração de transmissores de nível.

3.2. Limites de Faixa

Na prática, uma variável pode ter limites de operação normal e limites de operação anormal. Os limites de operação normal são aqueles assumidos pela variável quando não há problemas no controle automático do processo. Quando há falhas no controle automático e estes limites são atingidos, geralmente existem alarmes que chamam a atenção do operador para assumir o controle manual do processo. O operador deve levar os valores da variável novamente para dentro dos limites de operação normal, atuando manualmente nos instrumentos e equipamentos do processo. Quando, por motivos de falha em algum equipamento ou instrumento da malha de controle automático, a variável contínua se afastando dos limites de operação normal, geralmente são estabelecidos outros limites de desligamento (*trip* ou *shut*

down). Quando a variável atinge os valores de desligamento, todo o processo é desligado, para proteger o operador ou os equipamentos envolvidos.

Há variáveis que podem assumir valores negativos e positivos, em função do processo e da unidade usada. Por exemplo, a pressão manométrica pode ter valores positivos e negativos (vácuo). Porém, a pressão absoluta só pode assumir valores positivos. A temperatura na escala Celsius pode assumir valores negativos ou positivos; porém, a temperatura absoluta ou termodinâmica só pode assumir valores positivos, em kelvin.

3.3. Faixa e Desempenho do Instrumento

Em Metrologia, é fundamental se conhecer a faixa calibrada do instrumento e o seu ponto de trabalho, pois tipicamente, a precisão do instrumento é expressa ou em porcentagem do fundo de escala ou em porcentagem do valor medido.

O instrumento com erro de zero e de amplitude de faixa possui precisão expressa em porcentagem do fundo de escala. Por exemplo, a medição de vazão com placa de orifício tem incerteza expressa em porcentagem da vazão máxima medida ou do fundo de escala.

Instrumento com erro devido apenas à amplitude de faixa possui precisão expressa em porcentagem do valor medido. Por exemplo, transmissor inteligente de pressão diferencial, turbina medidora de vazão.

4. Função Matemática

4.1. Conceito

A função é uma regra de acordo com a qual os valores da variável independente correspondem aos valores da variável dependente. A função é a lei de correspondência entre os valores das variáveis. A função é uma relação causal. Podem existir regras para determinar o valor da variável dependente para cada valor do argumento sem relação matemática conhecida. Por exemplo, a temperatura ambiente varia ao longo de um dia ou de um ano, de modo aleatório e imprevisível.

As variáveis podem ser independentes ou dependentes de outras variáveis. As variáveis independentes podem se alterar arbitrariamente e são também chamadas de argumentos. Variáveis dependentes tem valores determinados pelos valores de outras variáveis independentes e são também chamadas de funções.

Por exemplo, a área A do círculo

$$S = \pi r^2$$

S é a variável dependente ou função
 r é a variável independente

As funções podem depender de um único argumento (área do círculo em função do raio) ou de dois ou mais argumentos. Por exemplo, a pressão de gás com massa constante, p

$$p = \frac{RT}{V}$$

depende da temperatura (T) e do volume do gás (V) e R é uma constante física.

4.2. Notação

Quando y é função genérica de x , tem-se:

$$y = f(x)$$

onde x pode assumir certos valores particulares.

Quando a função é conhecida, tem-se:

$$y = ax + b \text{ (linear)}$$

onde a e b são constantes arbitrárias.

Uma função matemática pode ser representada por:

1. fórmula analítica
2. tabela de valores
3. gráfico.

Domínio ou definição da função é a totalidade dos valores que a variável independente pode assumir.

A função pode ser contínua ou discreta. A função é contínua quando a variação gradual do argumento resulta em variação gradual da função, sem pulos. A função é discreta quando ela possui pontos de descontinuidade. A função pode ser periódica, quando se repete em intervalos definidos. A função pode ser constante, quando assume um único valor. A função pode assumir valores múltiplos e ser sempre crescente ou decrescente.

4.3. Função Linear

A função linear é muito interessante e comum. A sua forma geral é:

$$y = ax + b$$

onde

y é a função

x é o argumento

a e b são parâmetros constantes.

A representação gráfica de uma função linear é uma linha reta, onde

a é a inclinação da reta

b é o ponto onde a reta corta o eixo y

$-b/a$ é o ponto onde a reta corta o eixo

x

A linearidade é um dos parâmetros da precisão do instrumento. Ser linear é conveniente pois,

1. dois pontos são suficientes para determinar uma reta e por isso, basta calibrar apenas dois pontos de uma faixa de calibração,
2. é fácil se fazer interpolação e extrapolação de pontos.

Quando se tem uma relação não-linear é comum e conveniente linearizá-la, através da função matemática inversa. Por exemplo, na medição da vazão com placa de orifício, onde a pressão diferencial gerada pela placa é proporcional ao quadrado da vazão, usa-se o extrator de raiz quadrada para tornar linear a relação entre a pressão diferencial e a vazão.