

DIMENSIONAMENTO de VÁLVULAS de SEGURANÇA para GASES e VAPORES

Por: Artur Cardozo Mathias

Dentro de uma indústria de processo químico, centenas de vasos operam com diversos tipos de fluidos em diferentes estados físicos, além de variados valores de pressão e temperatura. Tais fluidos podem ser: água (líquidos em geral, incluindo condensado) que são os denominados **fluidos incompressíveis**, além de vapor d'água saturado ou superaquecido, ar comprimido e gases (tóxicos ou não), sendo os denominados **fluidos compressíveis**, e também os fluidos bifásicos (líquido + vapor). As válvulas de segurança e/ou alívio foram projetadas para operar com esses tipos de fluidos, protegendo aqueles vasos.

Mesmo que não exista a possibilidade de ocorrer um evento de sobrepressão, um vaso de pressão construído conforme o Código ASME Seção VIII – Divisão 1 – além de outras normas, obrigatoriamente requer a instalação de um dispositivo de alívio de pressão para sua proteção, podendo este ser, principalmente, uma **válvula de segurança e/ou alívio** ou um **disco de ruptura**. Tal obrigatoriedade é independente do estado físico do fluido.

Neste artigo trataremos do dimensionamento das válvulas de segurança operando com ar comprimido e outros gases devido às confusões que ainda existem. Tais confusões ocorrem entre o valor de vazão requerida que o usuário obtém no seu processo, na saída de um compressor, por exemplo, em pés³/min (CFM) ou em m³/h, e o valor de capacidade de vazão (nominal ou certificada) publicado nos catálogos dos fabricantes de válvulas de segurança, em SCFM, Nm³/min ou Nm³/h. Existem outras unidades de vazão para ar comprimido e outros gases, tais como lts/min, lts/h, etc.

O principal motivo da confusão é o usuário não se atentar para a **real temperatura e volume de operação** em relação **ao volume e à temperatura padrão** utilizada nos resultados dos cálculos **publicados** pelos fabricantes. Se ocorrer esta confusão, a válvula selecionada pelo usuário estará **subdimensionada**, não proporcionando ao processo a segurança que é esperada. Para evitar esta confusão deve-se primeiramente converter o volume da condição (real) do processo para outro volume numa condição “padronizada” ou “normalizada”. Esta conversão de “real” para “padronizada” ou “normalizada” (e vice-versa) é o que veremos aqui, além das principais características dos gases e que influenciam na capacidade de vazão e desempenho operacional das válvulas de segurança.



Desta forma, dizemos que (em unidades métricas) 1 Nm³ (Normal Metro Cúbico) de ar comprimido nada mais é que 1 m³ de ar submetido à pressão atmosférica e sob temperatura de 0°C. Da mesma forma (em unidades inglesas), 1 SCF (*Standard Cubic Feet*) é 1 pé cúbico padrão de ar comprimido submetido à pressão atmosférica e sob uma temperatura padrão de 60°F (15,56°C). Podemos dizer, então, que a unidade em Nm³/h ou em SCFM é o volume de ar aspirado por um compressor na **pressão atmosférica**, se a **temperatura local** estiver em 0°C ou 60°F, respectivamente, sob **altitude ao nível do mar e umidade relativa do ar** naquele local referente a 0% para ambas as unidades, ou seja, essas são as condições **padronizadas ou normalizadas** às quais uma determinada **pressão, temperatura e volume** de um determinado gás está submetido. Sendo sob essas condições de vazão que os fabricantes publicam os valores de **capacidade de vazão** de suas válvulas de segurança. Tais condições são obtidas através de testes realizados em laboratórios, devidamente aparelhados e utilizados para medir, certificar e aprovar essas capacidades de vazão, conforme é estabelecido pelo código ASME.

A figura 1 ao lado mostra uma válvula de segurança que pode ser aplicada com gases (não-tóxicos), incluindo ar comprimido, além de vapor d'água, para proteger vasos de pressão e tubulações:

GASES e VAPORES

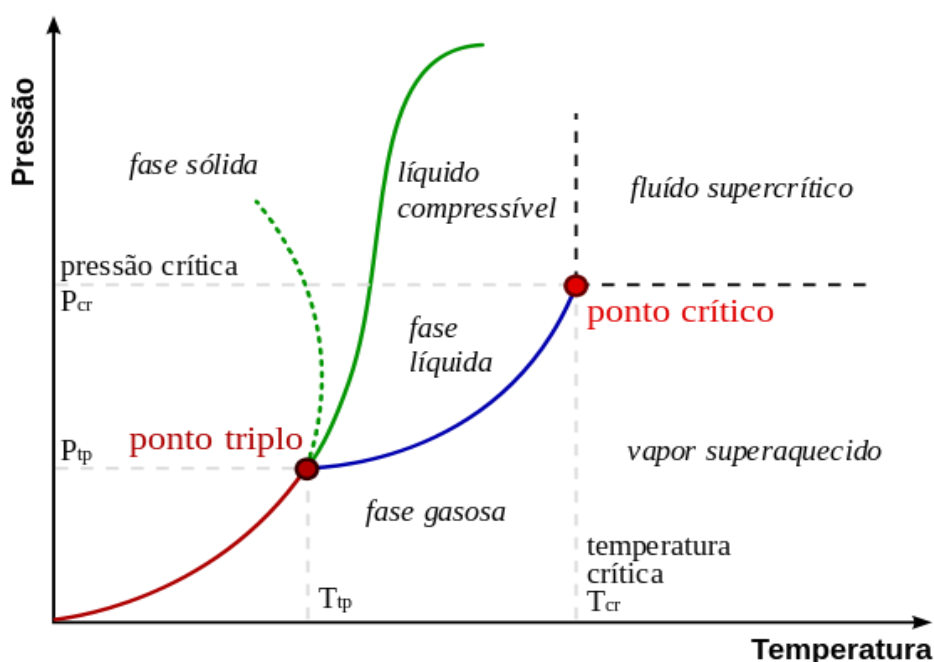
Gases e vapores são fluidos compressíveis, porém, somente os vapores podem ser **liquefeitos** com o **aumento da pressão**. Os fluidos compressíveis são aqueles que têm seu **volume alterado** tanto pela **pressão** quanto pela **temperatura**. Devido a terem esta característica de serem compressíveis, eles podem, então, ocupar diferentes volumes de acordo com a pressão e temperatura a que estão submetidos, devido à sua grande **expansibilidade**. Esta característica faz com que os gases possam se expandir e preencher total e uniformemente o recipiente que os contém.

A partir da **temperatura crítica*** podemos diferenciar os **gases**, dos **vapores**. Assim, um fluido no estado gasoso será um **gás** se sua temperatura estiver **acima** da temperatura crítica. Se esta temperatura estiver num valor **igual** ou **inferior** à sua temperatura crítica, aquele fluido será denominado **vapor**. Por exemplo, a temperatura crítica da água é de 374,15 °C e sua pressão crítica é de 220,6 bara (3200 psia). Estes são os maiores valores de **temperatura e pressão** que a água pode se transformar em **vapor d'água saturado**. Acima desses valores ela se transforma diretamente em **vapor d'água superaquecido**, ou seja, em **gás**.

O **vapor** está em estado de **equilíbrio térmico** com sua fase líquida, por exemplo, o vapor saturado e a água, juntos. Já o **gás** encontra-se num estado **termodinâmico**, ou seja, nenhum líquido ou sólido pode-se formar naquela temperatura. Isto quer dizer que um **vapor** pode **condensar** ou **evaporar** através de uma **redução** ou **aumento** na **pressão**, respectivamente, porém, com o **gás** isto **não** é possível. Assim, o **vapor** é o estado gasoso **abaixo** da temperatura crítica, enquanto o **gás** está **acima** desta temperatura.

OBS*: Para cada gás existe um valor de **temperatura** na qual não se consegue liquefazê-lo por mais que sua pressão seja elevada. Essa temperatura é conhecida por "**Temperatura Crítica**". Já a **pressão** necessária para que um gás seja **liquefeito** na temperatura crítica é conhecida por "**Pressão Crítica**". Esta é a **pressão de vapor** para uma determinada substância. Assim, é na temperatura crítica e na pressão crítica que o **ponto crítico** de uma substância está localizado. Esse ponto crítico é o local onde um líquido pode existir na **maior** temperatura possível antes de mudar para o estado vapor, ou seja, se observarmos um diagrama de fases, é no ponto crítico que **termina** a curva de equilíbrio líquido-vapor.

A figura 2 abaixo mostra um diagrama de fases da água onde aparecem o **ponto triplo** e o ponto crítico. É no ponto triplo que **coexistem** os estados sólido, líquido e gasoso. O ponto triplo que aparece nesta figura nos mostra o local onde está a **menor** temperatura na qual uma substância pode existir na fase líquida. O **ponto crítico** é aquele no qual **somente** o **estado gasoso** existe:



Na tabela 6 (na página 18) são mostrados diversos valores de **temperatura crítica** e **pressão crítica** para diversos gases de uso comum na indústria.

TRANSFORMAÇÕES GASOSAS – EQUAÇÃO GERAL dos GASES

Antes, para melhor entendimento das equações de conversão e de sua necessidade para o dimensionamento correto da mínima área de passagem do bocal de uma válvula de segurança, uma introdução às **transformações gasosas** e o **comportamento dos gases** quando submetidos a **diferentes valores de pressão, temperatura e volume**. Estas são transformações que envolvem uma **massa fixa de gás**. Essas transformações gasosas são denominadas por: **Isotérmica, Isocórica e Isobárica**.

São conhecidas as leis de BOYLE e MARIOTTE; a de CHARLES; e a de GAY-LUSSAC como a **lei geral dos gases perfeitos (Gases Ideais)** na qual é referida às transformações de estado dos gases. A equação geral dos gases perfeitos envolve uma relação entre as três variáveis de estado: **pressão, volume e temperatura**. Para essas transformações de estado, sempre uma variável permanecerá **constante** com **variações** nas outras duas.

Sendo que para as três transformações (Isotérmica, Isocórica e Isobárica) sempre uma das variáveis é **constante**, podemos relacionar essas três variáveis numa única equação, conforme mostra a equação 1:

$$\frac{P1 \cdot V1}{T1} = \frac{P2 \cdot V2}{T2} \quad \text{Equação 1}$$

Esta é a equação geral dos gases e relaciona o comportamento de um gás quando este sofre alteração em alguma de suas três variáveis. Deste modo, se tivermos uma massa fixa de um gás qualquer e esta sofrer uma transformação que nas quais aquelas grandezas de **pressão, volume e temperatura** vão se alterar, a relação entre $\frac{P \cdot V}{T}$, permanecerá constante. Portanto, Pressão, Volume e Temperatura são as denominadas **variáveis de estado de um gás**. Com essa expressão matemática sua aplicação se dá quando uma das três variáveis se modifica.

Pela “Lei Geral dos Gases” o volume de uma determinada massa de gás é sempre **inversamente proporcional** à pressão e **diretamente proporcional** à temperatura. Então sob volume constante, ao **aumentarmos** a temperatura de um gás **aumentamos** também sua pressão e vice-versa, ou seja, se diminuirmos sua temperatura diminuimos também sua pressão. Quando a **pressão** de um gás é **reduzida** a **densidade** também é **reduzida** e vice-versa.

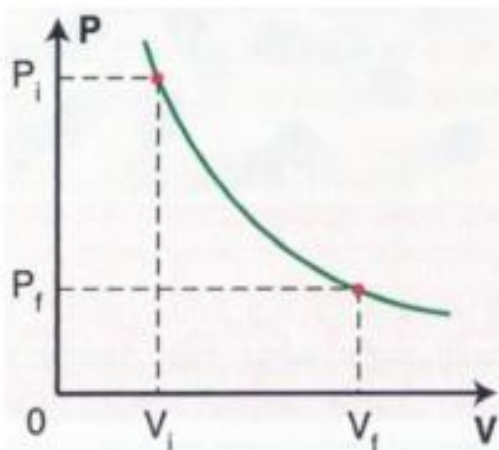
As expressões e suas leis a seguir são aplicadas quando uma das variáveis se mantém constante. Se alguma dessas variáveis tiver seu valor modificado pode-se prever o efeito nos valores das demais.

Lei de BOYLE-MARIOTTE – Em homenagem ao físico e químico irlandês Robert Boyle (1627 - 1691) e ao biólogo e físico francês Édme Mariotte (1620 - 1684), esta lei diz que quando a **temperatura** de um gás é mantida **constante** e há variações em sua pressão e volume, esta é chamada de **transformação isotérmica** (do grego: iso, igual, mesmo; thermo, calor).

Nesse tipo de transformação, tanto a **pressão** quanto o **volume** ocupado pelo gás são **inversamente proporcionais**.

Sendo que a temperatura é constante, portanto: $P1 \times V1 = P2 \times V2$. Desta forma, independentemente da natureza química do gás, se a **pressão dobra**, o **volume** é reduzido pela **metade** ou se a **pressão triplica** o **volume** é reduzido a um **terço** e assim por diante. Por outro lado, se o volume dobra a **pressão** é reduzida pela **metade** e se o **volume triplica** a **pressão** é reduzida a um **terço**. Nesse tipo de transformação, a energia interna do gás não se altera.

Portanto, se fizermos um gráfico para representar essa transformação, o resultado será uma **hipérbole**, isto é, um gráfico com **duas grandezas inversamente proporcionais**, como podemos verificar abaixo na figura 3:



Podemos ver nesta figura, que com o **aumento** da temperatura, o produto $P \times V$ se **eleva** e com isso as isotermas vão se afastando do ponto de origem dos eixos.

Um exemplo prático de **transformação isotérmica** ocorre quando uma válvula de segurança descarrega algum fluido compressível (vapor d'água saturado, por exemplo) diretamente para a atmosfera sob **temperatura constante** e variações somente na **pressão e volume**, que são características fundamentais para esse tipo de transformação.

O que ocorre nesse tipo de transformação é que quanto **maior** for a **temperatura** de um gás, **maior** também será a **energia cinética** das **moléculas** que o constituem, com isto, **maior** velocidade terão essas moléculas. A **maior expansão do gás** é devido à **maior velocidade** dessas moléculas. Sendo

assim, nesse tipo de **transformação** existe uma **relação direta** entre a **temperatura** de um gás e as **moléculas** que o constituem. Essas moléculas encontram-se muito afastadas umas das outras, daí a grande expansão dos gases. Desta forma, quanto menor for o volume ocupado por uma determinada massa de gás (para uma pressão cada vez maior), maior também será o número de colisões das moléculas com as paredes do recipiente que o contém. Portanto, quando o **volume** de um gás é **reduzido** ocorre um **aumento** na **pressão**, e vice-versa. Para exemplificar, quando 1 litro de água está submetido à pressão atmosférica e é vaporizado (transformado em vapor d'água saturado), seu **volume** no estado **vapor** ocupa um espaço 1725 vezes **maior** do que aquele ocupado no estado **líquido**. Por outro lado, quanto menor for a temperatura, menor também será o movimento das moléculas que o constituem, com isto o gás irá ocupar um volume menor.

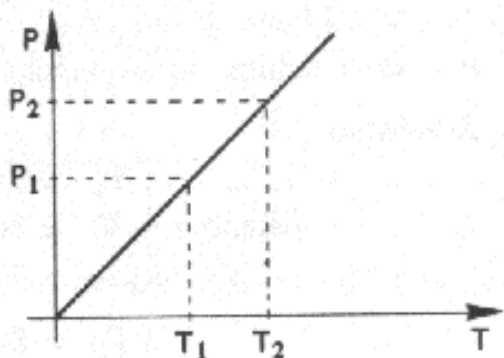
Quando a válvula abre (atua) e descarrega, a pressão atuando após o disco e bocal é menor do que dentro do bocal e do equipamento protegido. Com esta **pressão menor** o **volume** torna-se **maior**. É por esta razão que o flange de saída e a tubulação de descarga de uma válvula de segurança tem a área de passagem sempre maior que a do flange de entrada, ou seja, quando a válvula descarrega diretamente para a atmosfera, por exemplo, a **redução da pressão** causa um **aumento** no **volume**. A maior área na saída permite "acomodar" aquele **aumento** no **volume**, **reduzindo** a **pressão** mais rapidamente, além de **reduzir** o **nível de ruído** gerado pelo escoamento de um fluido compressível. A **maior área interna do flange de saída** e da tubulação de descarga também **minimiza** os efeitos da **contrapressão desenvolvida**. Esses efeitos podem afetar o bom comportamento operacional de uma válvula de segurança estilo **convencional** e que possui castelo e capuz, ambos do tipo fechado, principalmente naquelas em bitolas a partir de 6" de saída, devido à **menor** relação de áreas entre a área do flange de saída para a área da garganta do bocal.

A lei de Boyle-Mariotte deixa de ser aplicada quando a pressão de um gás é elevada demasiadamente até o ponto de liquefazê-lo. A partir deste ponto o volume não é mais **reduzido** devido à **incompressibilidade** dos líquidos, porém, a pressão continua a se **elevar**.

Lei de CHARLES – Em homenagem ao matemático e físico francês Jacques Alexandre César Charles (1746 - 1823), esta lei diz que quando o **volume** de um gás permanece **constante** e há variações na pressão e temperatura, ela é chamada de **transformação isocórica**. (do grego: iso, igual, mesmo; coros, volume). Ela também é conhecida por isovolumétrica, isométrica ou ainda por **termocompressão**.

Quando um gás sofre esse tipo de transformação, sua **pressão** é **diretamente proporcional** à sua **temperatura absoluta**. Portanto, aqui se a **temperatura dobra** a **pressão** também **dobra**, enquanto que se a **temperatura é reduzida** pela **metade** a **pressão** também se **reduz à metade**.

Como a variação na pressão ocorre em função direta da temperatura, ou seja, uma variação diretamente proporcional (linear), então o gráfico é representado por uma reta. Podemos verificar esse tipo de transformação no gráfico que aparece ao lado na figura 4:



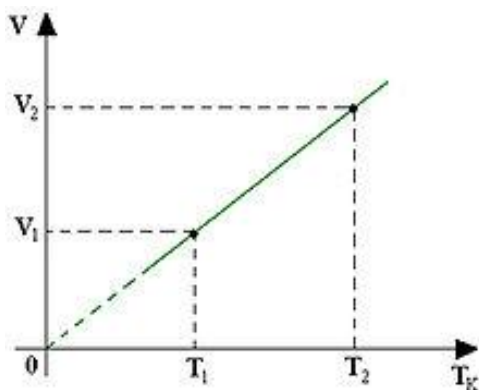
Observação: Apesar de esta reta crescente ter **início** no ponto “zero” de pressão e temperatura, porém, **não pode existir pressão** com valor zero, apenas **temperatura** neste valor.

Deste modo, um **volume** qualquer de gás será **diretamente proporcional** à sua temperatura absoluta e **inversamente proporcional** à sua **pressão absoluta**. Sendo que o volume é constante, portanto: $P_1/T_1 = P_2/T_2$ ou $P/T = \text{constante}$.

Um exemplo prático desse tipo de transformação pode ser visto numa caldeira quando a água, pré-aquecida e sob pressão, é transformada em vapor d'água saturado, ou seja, ocorre primeiro um **aumento do calor sensível** sobre a água e, posteriormente, um **aumento do calor latente**. No primeiro, há um **aumento na temperatura e redução na densidade**, sem haver **mudança de fase**. Já no segundo, há **mudança de fase** (mudança de estado físico), ou seja, de líquido para vapor, mas sem haver mudança de temperatura.

Observação: O calor latente representa **75%** do **calor total** contido no vapor, enquanto os 25% restantes pertencem ao calor sensível. O **calor sensível** é aquele que pode ter seu valor medido (“sentido”) através de um termômetro, por exemplo. O calor latente é o **calor oculto** contido no vapor. Portanto, a passagem da água do estado líquido para o estado vapor é uma transformação isocórica ou isovolumétrica, isto porque, teoricamente, o volume de água que entra na caldeira é **constante**. Deste modo, para cada valor de pressão haverá também um valor de temperatura, definidos. Assim, com o aumento da temperatura haverá também um aumento na pressão (e vice-versa), porém, sempre sob volume constante.

Lei de GAY-LUSSAC – Em homenagem ao físico e químico francês Joseph Louis Gay-Lussac (1778 - 1850), esta lei diz que quando um gás tem sua **pressão** mantida num valor **constante** e as variações que ocorrem são apenas na **temperatura e volume**, ela é chamada de **transformação isobárica** (do grego: iso, igual, mesmo; baros, pressão). Um gás submetido à **pressão**, estando sob **volume constante**, essa pressão é **diretamente proporcional** à **temperatura** na escala Kelvin (temperatura absoluta). Da mesma forma, quando o volume de um gás é submetido à **pressão constante**, o volume desse gás é **diretamente proporcional** à temperatura na escala Kelvin. Quando um gás sofre esse tipo de transformação, o volume é diretamente proporcional à sua temperatura absoluta. Por esta lei, teoricamente, os gases se expandem aproximadamente 1/273 de seu volume a 0°C para cada grau Celsius que a temperatura aumenta, desde que o valor da pressão permaneça constante. Sendo que a pressão é constante, portanto: $V_1/T_1 = V_2/T_2$. Então, se esta **temperatura dobra** seu **volume** também **dobra**, enquanto que se a **temperatura é reduzida pela metade**, o **volume** também é **reduzido pela metade**. É em função do aumento de volume causado pelo aumento de temperatura que a pressão não aumenta.



Esta lei é exemplificada no gráfico mostrado ao lado na figura 5:

Na **transformação isobárica** o gráfico apresenta uma **reta crescente**, pois o **volume** varia **linearmente** com a temperatura e sob pressão constante. Podemos verificar com esta lei que quando a **temperatura** do gás **aumenta** seu **volume** também **aumenta**, conseqüentemente, a capacidade de vazão efetiva de uma válvula de segurança, para uma determinada área final dimensionada e selecionada, fica **menor**. Isto significa que se há um **aumento** na **temperatura** com conseqüente **aumento** no **volume**, a área de passagem do bocal de uma válvula de segurança, **limita** sua

capacidade de vazão a valores cada vez **menores** para a mesma pressão de ajuste.

Observação: A **linha tracejada** da reta crescente deste gráfico tem **início no ponto zero**, pois não pode existir **volume** zero, apenas o valor da **temperatura** pode ser encontrado neste valor.

Isto também ocorre quando calculamos a área do bocal de uma válvula de segurança operando com vapor d'água superaquecido, ou seja, quando a válvula é calculada para determinada temperatura o **fator de correção Ksh** adequada a área de passagem do bocal aos diferentes volumes de vapor de acordo com cada temperatura. Portanto, quando o vapor d'água está no estado superaquecido ele pode ter diversos valores de

temperatura para a mesma pressão, desde que esta permaneça num valor constante. Para o cálculo de dimensionamento para esse tipo de fluido haverá **diversos valores** para o fator de correção Ksh para **diversos valores de temperatura** resultando em **diferentes volumes**, e para a **mesma pressão de alívio** da válvula de segurança. Os **valores do fator Ksh são tabelados** pelo código ASME e pelos fabricantes de válvulas de segurança.

Um exemplo prático desse tipo de transformação também pode ser visto numa caldeira provida de superaquecedor. A transformação do vapor d'água do estado **saturado** para o estado **superaquecido** é uma **transformação isobárica**, pois há **aumento de temperatura e volume sob pressão constante**. A pressão na saída do **superaquecedor** pode variar em relação à pressão existente no **tubulão de vapor** onde é produzido o **vapor d'água saturado**, devido à inerente queda de pressão existente no percurso do vapor entre aquele tubulão e a saída do superaquecedor, passando pelos superaquecedores primário, secundário, dessuperaquecedor etc. Essa queda de pressão também pode ter valores diversos devido às variações de consumo do vapor produzido pela caldeira. A umidade presente no vapor d'água saturado também contribui para esta queda de pressão. Quanto maior for o tamanho da caldeira e do superaquecedor e, conseqüentemente, do volume do vapor d'água superaquecido produzido e posteriormente consumido pelo processo, maior também será esta queda de pressão.

O que ocorre com o volume dos gases, incluindo o ar comprimido quando a temperatura aumenta ou diminui, desde que a pressão seja mantida constante, é comprovado pela lei de GAY-LUSSAC, ou seja, se a temperatura **real** é **maior** em relação à temperatura **padrão**, então o **volume real** também será **maior** em relação ao **volume padrão**. É devido a esta lei que não devemos utilizar como referência para o cálculo e seleção da área de passagem do bocal de uma válvula de segurança que irá operar com gás ou ar comprimido, o volume real sem antes fazermos a conversão para as condições “padronizadas” ou “normalizadas”. O **volume** dos gases varia com a **pressão** (de forma inversamente proporcional) devido à característica que eles têm de serem **compressíveis**, e também com a **temperatura** devido à **dilatação térmica**.

PADRONIZAÇÃO ou NORMALIZAÇÃO da VAZÃO

No dimensionamento de válvulas de segurança, além de outros equipamentos que irão operar com ar comprimido ou outros gases, por exemplo, muitos problemas podem ocorrer quando o usuário, não distingue entre o volume nas **condições reais de operação** e o volume nas **condições padronizadas ou normalizadas**. A influência que a pressão e a temperatura tem sobre o volume dos gases é tão significativa que sempre que é fornecido o **volume** de um gás devemos também fornecer os valores de **pressão e temperatura**, pois este volume não será o mesmo se houver alterações nos valores destas duas últimas variáveis. Assim, ao fornecermos o volume de um gás ao fabricante de uma válvula de segurança, devemos mencionar também os valores de pressão e temperatura. Portanto, a referência ao volume deve vir acompanhada dos valores de pressão e temperatura do gás, pois aquelas variáveis de estado mencionadas no início são **dependentes** entre si umas das outras.

As equações utilizadas para a conversão de m³/h para Nm³/h e vice-versa, e de CFM (pés³/min) para SCFM e vice-versa, provém da equação geral dos gases, mostrada anteriormente na equação 1.

Normalmente o usuário determina sua **capacidade de vazão requerida na temperatura real** do processo. Enquanto o fabricante publica a **capacidade de vazão nominal ou certificada** através do bocal de sua válvula de segurança, numa condição “padronizada” ou “normalizada”.

A condição padronizada (*standard*) é aquela em que a capacidade de vazão normalmente vem em SCFM (*Standard Cubic Feet Minute*), ou seja, pés cúbicos padrão por minuto. Ela é definida como a taxa de fluxo volumétrica de um gás corrigida para as condições padronizadas de pressão e temperatura. Esta é muito utilizada por países ou empresas que adotam **unidades inglesas**. Ela pode ser encontrada também em SCFH (*Standard Cubic Feet Hour*), ou seja, pés cúbicos padrão por hora.

O termo SCFM incorpora pressão, temperatura, volume e ainda pode incluir a umidade relativa e a pressão de vapor, nas condições de entrada, para se ter maior precisão no resultado final, principalmente nos cálculos de válvulas de segurança envolvendo ar comprimido para a proteção de saída de compressores ou reservatórios de ar comprimido.

A letra S de *standard* significa que o gás foi medido numa condição **padronizada** de pressão, temperatura, umidade relativa e pressão de vapor, resultando numa taxa de fluxo precisa, enquanto o CFM é

uma medição do volume de gás que ocorre numa pressão e temperatura reais do processo. Numa **condição real** os valores de **pressão, temperatura, umidade relativa e pressão de vapor** podem ter valores diversos. Podemos concluir, então, que SCFM é a determinação do **volume do gás** colocado num **ambiente controlado**. O valor em SCFM representa o fluxo real encontrado no processo, porém, numa condição padrão de pressão, temperatura, umidade relativa e pressão de vapor.

A sigla SCFM é, portanto, utilizada geralmente para designar a vazão de algum gás tendo uma **base de referência**. Se as **condições de processo** são diferentes das **condições padronizadas** de pressão, temperatura, umidade relativa e pressão de vapor, uma **correção** deve ser feita para refletir a condição real. A umidade relativa, a temperatura e a altitude onde o ar comprimido é obtido **alteram** sua **densidade**, portanto, alterando seu **volume**. Desta forma, **alterando a máxima capacidade de vazão** permitida pela **área do bocal** de uma válvula de segurança.

Existem várias definições para SCFM, a mais comum utilizada é com as propriedades do ar ao nível do mar, ou seja, temperatura de 60°F, pressão atmosférica de 0 psig quando dado em pressão manométrica (pressão relativa) ou 14,7 psia quando em **pressão absoluta** e umidade relativa de 0%. A unidade psia é equivalente a zero somente sob condições de vácuo perfeito.

A equação 2 a seguir, é utilizada para conversão da vazão e é derivada da equação geral dos gases perfeitos. P1, V1 e T1 são os valores iniciais (reais do processo), enquanto P2, V2 e T2 são os valores finais (padronizados ou normalizados). É o volume final (V2) que será comparado com as tabelas dos fabricantes de válvulas de segurança para a seleção do orifício do bocal.

$$V2 = V1 \cdot \frac{P1}{P2} \cdot \frac{T2}{T1} \quad \text{Equação 2}$$

Essa equação é muito útil para que seja determinado o novo estado de um gás quando este sofreu alguma alteração. Portanto, se soubermos o volume de um gás (em m³/h ou em pés³/min) numa determinada condição de pressão, temperatura, umidade relativa e pressão de vapor, com o uso dessa equação poderemos determinar seu novo volume numa outra condição de pressão, temperatura, etc (condição padrão ou normal).

As fórmulas para a conversão de **real** para **padronizada** ou para **normalizada** seguem o sistema inglês ou métrico, respectivamente. Na fórmula da padronização, a pressão de alívio da válvula deve ser a soma da pressão de ajuste + sobrepressão + pressão atmosférica e sua unidade será o psi. Devido à inclusão do valor da pressão atmosférica* (14,7 psi), o valor final da **pressão** estará em **unidades absolutas**. Da mesma forma, a **temperatura** deverá estar em **unidades absolutas**, ou seja, em **psia**. Como a unidade de pressão é o psi, a unidade de temperatura será o **Rankine** (°R). Esta é a soma de 460 °R + °F (temperatura real do processo convertida de °C para °F).

Observação*: Em válvulas de segurança utiliza-se o valor da pressão atmosférica, somada à de ajuste e sobrepressão no cálculo da pressão de alívio, sempre que o fluido for compressível, para anular o efeito da pressão atmosférica que atua como **contrapressão superimposta constante** durante a descarga pela válvula.

Na fórmula da **normalização**, a pressão absoluta deverá estar em bara (bar absoluto) e a temperatura absoluta em Kelvin (K), que é a soma da temperatura em graus Celsius + 273. A pressão atmosférica em bar é equivalente a 1,013. Com as condições reais, seja em pés³/min ou m³/h, o usuário deverá primeiramente converter para SCFM ou Nm³/h, respectivamente, antes de calcular a área de passagem mínima requerida.

Na condição normalizada a vazão está em Nm³/h (Normal Metro Cúbico por Hora) e a definição é a mesma que foi mencionada para SCFM, mudando apenas as unidades de pressão e temperatura, além dos valores da própria temperatura. Estes valores são os mesmos mencionados quando se estuda os gases nas **CNTP's** (Condições Normais de Temperatura e Pressão). Esta é adotada por aqueles (países ou empresas) que utilizam **unidades métricas**.

Quando o volume do gás é medido sob pressão de 14,7 psi (1,013 bar) e sob temperatura de 0°C (273 K), dizemos que essas são “condições normais” ou normalizadas e o volume do gás em m³/h, por exemplo, deve vir com o valor acompanhado pela letra N (maiúscula). Portanto, um volume de gás medido nas condições acima deve estar descrito em Nm³/h (normal metro cúbico por hora). As unidades “padronizadas”

ou “normalizadas” representam o volume de certa **massa** de ar ou gás sob **condições fixas** de pressão e temperatura. A equação 3 abaixo mostra como é feita a **padronização** da vazão a partir da **vazão real**, em pés³/min (CFM). Na equação 4 é mostrado como é feita a **normalização** da vazão a partir da **vazão real**, em m³/h.

Observação: O valor de 1,013 bar é a pressão atmosférica medida ao nível do mar por um instrumento denominado **barômetro**. Esta pressão é denominada **absoluta**.

A inclusão da umidade relativa e pressão de vapor são para corrigir estas em relação às condições padronizadas ou normalizadas. Muitos não incluem estes dados devido à sua influência no resultado final serem **insignificantes** ou quando a temperatura de referência é 60°F na qual a umidade relativa nas condições de referência é 0%. Tanto a umidade relativa quanto a pressão de vapor da água contida na umidade deverão ser subtraídas da pressão de alívio da válvula na equação de conversão como podemos ver na sequência nas equações 3 a 6:

$$SCFM = CFM \cdot \left(\frac{14,7 + P - (Urr \cdot pvr)}{14,7} \right) \cdot \left(\frac{520}{460 + T} \right) \quad \text{Equação 3}$$

$$Nm^3/h = m^3/h \cdot \left(\frac{1,013 + p - (Urr \cdot pvr)}{1,013} \right) \cdot \left(\frac{273}{273 + t} \right) \quad \text{Equação 4}$$

As equações 5 e 6 podem ser utilizadas para converter a taxa de fluxo nas condições padrão ou normalizada, respectivamente, em condições reais:

$$CFM = SCFM \cdot \left(\frac{14,7}{14,7 + P - (Urr \cdot pvr)} \right) \cdot \left(\frac{460 + T}{520} \right) \quad \text{Equação 5}$$

$$m^3/h = Nm^3/h \cdot \left(\frac{1,013}{1,013 + p - (Urr \cdot pvr)} \right) \cdot \left(\frac{273 + t}{273} \right) \quad \text{Equação 6}$$

Nomenclaturas utilizadas nas equações 3, 4, 5 e 6:

SCFM = Vazão do gás nas **condições padronizadas** de pressão e temperatura, em unidades inglesas;

CFM = Vazão do gás nas **condições reais** de pressão e temperatura, em unidades inglesas;

Nm³/h = Vazão do gás nas **condições normalizadas** de pressão e temperatura. O valor de **1,013** é referente à pressão atmosférica somente quando a unidade de pressão está em bar. Quando esta unidade está em **kgf/cm²**, aquele valor deve ser substituído por 1,033. A unidade de temperatura contínua em Kelvin;

m³/h = Vazão do ar comprimido ou gás nas **condições reais** de pressão e temperatura, em unidades métricas;

P = Pressão de ajuste da válvula, em psig + sobrepressão*;

p = Pressão de ajuste da válvula, em barg, + sobrepressão*;

OBS*: Nos cálculos de válvulas de segurança para a proteção de vasos de pressão, o valor da sobrepressão a ser utilizado deverá ser 3 psi (0,2 barg) acima da pressão de ajuste ou 10% acima da pressão de ajuste, o que for maior.

T = Temperatura do gás em °R (°F + 460);

t = Temperatura do gás, em K (°C + 273);

Urr = Umidade relativa local na **condição real**, em % (por exemplo, 65% é igual a 0,65 na fórmula);

Pvr = Pressão parcial de vapor na **condição real** (em psia conforme tabela 1). Se o cálculo for em unidades métricas os valores em psia da tabela 1 devem ser divididos por 14,504 para serem transformados em bara (bar absoluto).

A tabela 1, a seguir, mostra alguns valores de referência de **pressão de vapor**, em psia, de acordo com a temperatura, em °F. A pressão de vapor deve ser determinada de acordo com a **temperatura** do fluido na **entrada** da válvula:

°F	psia	°F	psia	°F	Psia	°F	Psia	°F	psia	°F	psia
32	0,8859	47	0,15909	63	0,2850	79	0,4909	95	0,8162	111	1,3133
32,018	0,8866	48	0,16520	64	0,2952	80	0,5073	96	0,8416	112	1,3516
33	0,9223	49	0,17151	65	0,3057	81	0,5241	97	0,8677	113	1,3909
34	0,9601	50	0,17803	66	0,3165	82	0,5414	98	0,8945	114	1,4311
35	0,9992	51	0,18477	67	0,3276	83	0,5593	99	0,9220	115	1,4723
36	0,10397	52	0,19173	68	0,3391	84	0,5776	100	0,9503	116	1,5145
37	0,10816	53	0,19892	69	0,3510	85	0,5964	101	0,9792	117	1,5578
38	0,11250	54	0,20635	70	0,3632	86	0,6158	102	1,0090	118	1,6021
39	0,11700	55	0,2140	71	0,3758	87	0,6357	103	1,0395	119	1,6475
40	0,12166	56	0,2219	72	0,3887	88	0,6562	104	1,0708	120	1,6940
41	0,12648	57	0,2301	73	0,4021	89	0,6772	105	1,1029	121	1,7417
42	0,13146	58	0,2386	74	0,4158	90	0,6988	106	1,1359	122	1,7904
43	0,13662	59	0,2473	75	0,4300	91	0,7211	107	1,1697	123	1,8404
44	0,14196	60	0,2563	76	0,4446	92	0,7439	108	1,2044	124	1,8915
45	0,14748	61	0,2655	77	0,4596	93	0,7674	109	1,2399	125	1,9438
46	0,15319	62	0,2751	78	0,4750	94	0,7914	110	1,2763	126	1,9974

No escoamento de gases através de válvulas de segurança, além de outros equipamentos, normalmente são encontrados dois tipos de vazão: sendo a vazão em **massa** (mássica) ou a vazão em **volume** (volumétrica). Na vazão em **massa** é mais difícil ocorrer erros por subdimensionamento da válvula, pois esta **não precisa** de uma **condição de referência**. Já a vazão **volumétrica** necessita que a **pressão** e a **temperatura** do fluido estejam numa **condição de referência** (em SCFM ou em Nm³/h). A vazão, se em massa ou volumétrica, depende da aplicação. A volumétrica é a que será abordada aqui, sendo muito aplicada para a produção de ar comprimido, cuja função será movimentar válvulas de controle automáticas, por exemplo, além de outros equipamentos pneumáticos. Os cálculos para vazão em massa serão abordados no final desse texto.

Assim fica fácil compreendermos o porquê do subdimensionamento que pode ocorrer caso compararmos o **volume requerido** pelo processo com a **capacidade de vazão publicada** pelos fabricantes. Por exemplo, se a capacidade de vazão requerida pelo processo for de 2500 pés³/min (3275,2 m³/h) para uma pressão de ajuste de 100 psig (6,9 barg) e 40°C (104°F) vamos encontrar nas tabelas de vazão dos fabricantes uma válvula orifício “J” (1,287 pol²). Porém, as tabelas dos fabricantes foram publicadas sobre valores de temperatura de 60°F (15,56°C) e com a descarga ocorrendo diretamente para a atmosfera. Sendo que o **volume** dos gases **umenta** proporcionalmente com o **aumento da temperatura** (transformação

isobárica), temos então que selecionar uma válvula com a área do bocal capaz de permitir a vazão do gás nas **condições padronizadas** para adequar a área de passagem do bocal ao volume do gás para as **condições reais**. O maior efeito no resultado final está relacionado com a **variação da temperatura** entre a condição padronizada e a condição real. A temperatura do ar comprimido na descarga de um compressor, por exemplo, pode variar de 85 °C a 180 °C, dependendo do tipo de compressor utilizado. Por esta razão os compressores utilizam um resfriador de ar, ou seja, um *aftercooler* na descarga para **reduzir** a temperatura do ar comprimido na saída e coloca-lo numa temperatura bem **menor** e mais adequada ao processo.

Desta forma, como a área de passagem da garganta do bocal é fixa, aquele **volume real** na temperatura de 40°C numa pressão de ajuste de 100 psig terá o **volume proporcional** à temperatura de 60°F (15,56°C) e na pressão atmosférica. Em outras palavras, como o volume dos gases **umenta** com o **aumento** da temperatura e **reduz** com o **aumento** da pressão, aquela área do bocal selecionada no exemplo acima, para permitir aquela passagem do volume de gás de 2500 CFM deverá permitir, nas condições padronizadas, a passagem de um volume de 19553,3 SCFM. Assim, se pegarmos esse mesmo volume de 19553,3 SCFM que foi gerado sob pressão atmosférica e que está escoando por aquela área de 1,287 pol² e numa temperatura de 60°F (15,56°C), se aumentarmos essa temperatura para 40°C (104°F) e a pressão para 100 psig (7,03 kgf/cm²), será permitida a passagem de apenas 2500 pés³/min. Portanto, sendo que as unidades significam “volume por tempo” a uma determinada pressão e temperatura, a **vazão volumétrica** será **menor** para uma **área fixa** quando a **temperatura** e a **pressão** forem **elevadas**.

Isto comprova a lei de GAY-LUSSAC, ou seja, ela é uma transformação isobárica na qual o volume que é ocupado por uma determinada massa gasosa é diretamente proporcional à sua temperatura. O aumento de volume em relação à temperatura é linear, ou seja, sua representação gráfica é uma reta. Assim, com uma **pressão e temperatura maiores a área do bocal** “deixa passar” um volume menor quando a válvula abre e descarrega.

A **quantidade** de ar comprimido, por exemplo, que **entra** por um **compressor** sob **pressão atmosférica e temperatura ambiente** deverá sair pela válvula de segurança numa determinada **pressão de ajuste e temperatura, maiores**.

A conversão se faz necessária, pois a capacidade de vazão efetiva no bocal da válvula de segurança na **temperatura real** será **menor** do que na **temperatura padrão**, conforme é **publicada** pelos fabricantes através de seus catálogos. É também sob essas condições normalizadas ou padronizadas que a capacidade de vazão máxima da válvula vem obrigatoriamente marcada em sua **plaqueta**.

Contudo, se o usuário manter a mesma pressão de ajuste, mas alterar o valor da temperatura de seu processo, a capacidade de vazão através do bocal de sua válvula de segurança também será alterada.

Uma variação na temperatura padrão pode resultar numa significativa variação volumétrica para a mesma massa de taxa de fluxo. Por outro lado, sob temperatura fixa, valores diferentes de pressão de ajuste podem resultar na mesma área mínima requerida e, conseqüentemente, na mesma área final selecionada e com capacidade de vazão efetiva diretamente proporcional ao aumento do valor da pressão de ajuste para o mesmo valor de taxa de fluxo requerida. Veja vários exemplos na tabela 2 abaixo considerando-se a **temperatura de 40 °C** para todos os exemplos, tendo o ar comprimido como fluido.

Pressão de Ajuste (psig)	Pressão de Alívio Absoluta (psia)	Área Mínima Requerida (pol ²)	Área Final Selecionada (pol ²)	Vazão Requerida (CFM)	Vazão Final Pelo Bocal Selecionado (SCFM)	Vazão Final pelo Bocal em Condições Reais (CFM)
54	74,1	1,68	1,838	460	2340,5	503,26
88	111,5	1,68	1,838	460	3525,75	503,26
118	144,5	1,68	1,838	460	4563	503,26
176	208,3	1,68	1,838	460	6587,5	503,26
230,4	268,14	1,68	1,838	460	8464	503,26

Tabela 2: Elaborada pelo autor.

Pela tabela acima podemos verificar que para a mesma vazão inicial requerida por diferentes processos (460 CFM) e para diferentes valores de pressão de ajuste, porém, para igual valor de temperatura, a área mínima requerida (1,68 pol²) e a área final selecionada (1,838 pol²) serão as mesmas, entretanto, a

capacidade de vazão nominal ou **certificada** publicada pelo fabricante de cada válvula selecionada nas condições *Standard* será **diretamente proporcional** ao valor da pressão de ajuste, enquanto a **vazão final** pelo bocal de cada válvula nas **condições reais** também será a mesma, independente do valor da pressão de ajuste.

Ainda utilizando os dados do exemplo acima, se não atentarmos para a padronização ou normalização da vazão e escolhermos a válvula diretamente pelos catálogos dos fabricantes somente com a vazão requerida pelo processo nas **condições reais**, a **área mínima requerida** e a **área final selecionada** vai ficando cada vez **menor** com o **aumento** da pressão de ajuste.

Vamos agora com os valores que aparecem na tabela 3 simular algumas situações nas quais haverá **variações na temperatura** do ar comprimido, porém, sem **variações na vazão** requerida pelo processo (1000 CFM), na pressão de ajuste da válvula e na umidade relativa do ar. Iremos adotar uma pressão de ajuste de 7,8 kgf/cm² (110,94 psig) e umidade relativa de 45% para as quatro situações para facilitar o entendimento. Para esta simulação adotaremos quatro diferentes valores de temperatura (T), inclusive a temperatura de referência para a condição *Standard*, ou seja, 15,56°C (60 °F); a pressão de vapor é a mesma que aparece na tabela 1 de acordo com a **temperatura do ar na entrada da válvula**:

T ^a em °C (°F)	Pressão de Vapor (psia)	Pressão de Alívio Absoluta (psia)	Vazão Req (CFM)	Área Mín Req (pol ²)	Área Final Selec (pol ²)	Vazão Final Pelo Bocal Selecionado (SCFM)	Vazão Final pelo Bocal em Condições Reais (CFM)
15,56 (60)	0,2563	136,73	1000	3,8	4,34	10613,15	1142,03
25 (77)	0,4596	136,73	1000	3,74	4,34	10443,8	1161,3
35 (95)	0,8162	136,73	1000	3,67	4,34	10273,05	1182
50 (122)	1,7904	136,73	1000	3,57	3,6	8321,42	1007,3

Tabela 3: Elaborada pelo autor.

Pela tabela acima podemos verificar que para **diferentes** valores de **temperaturas**, mas para a **mesma pressão de ajuste** e, conseqüentemente, mesma pressão de alívio, a área mínima requerida foi ficando cada vez **menor**, até o momento em que houve uma mudança no valor do orifício selecionado. Com a mesma área final selecionada (orifício N), mas a temperatura cada vez **maior**, a vazão **nominal** publicada e estampada na plaqueta da válvula, em SCFM, foi ficando cada vez **menor** e com isso a vazão efetiva final pelo bocal selecionado nas **condições reais** foi ficando cada vez **maior** até a mudança na área do orifício selecionado ocorrer para um orifício ainda **menor** (orifício M). Podemos verificar com esses exemplos que enquanto a área mínima requerida foi sendo **reduzida** e o orifício final selecionado era o mesmo, este orifício final foi permitindo a passagem de cada vez **menor** quantidade de fluido. Isso é devido à influência do **aumento de temperatura** proporcionalmente ao **aumento de volume** do ar comprimido. Conforme a área mínima requerida foi ficando cada vez **menor**, a diferença dela para a área final selecionada foi ficando cada vez **maior**, por esta razão a vazão final nas **condições reais** é também cada vez **maior**.

No exemplo anterior mostrado na **tabela 2** como não houve alterações no valor da temperatura, a **área mínima requerida**, a **vazão mínima requerida** pelo processo e a **vazão efetiva pelo bocal** selecionado nas condições **reais** foram **coincidentes** para todas as situações.

Uma **taxa de fluxo volumétrica** com unidade em pés³/min ou m³/h implica que a taxa de fluxo (volume) foi medida em **condições reais**, tanto de pressão quanto de temperatura. A distinção entre essas duas unidades (pés³/min ou SCFM) ou em m³/h ou Nm³/h é importante devido às mudanças na **densidade do gás** devido à **pressão e temperatura**. Essa densidade é **diretamente proporcional** à pressão e **inversamente proporcional** à temperatura. A densidade do ar no **local da instalação** de um compressor, por exemplo, pode **variar** com a temperatura, umidade relativa e altitude. Assim, no exemplo dado anteriormente, 2500 CFM é igual a 19553,3 SCFM. Este valor representa um fator de 7,82 para 1 neste exemplo, ou seja, o volume nas **condições padronizadas** é 7,82 vezes maior que nas condições **reais**.

Observação: A partir desta proporção podemos verificar o quanto uma válvula de segurança pode estar **subdimensionada** quando os cálculos de **conversão de vazão real para padronizada ou normalizada** não são feitos antes da especificação e compra.

CFM é uma medição nas **condições reais** de pressão e temperatura, podendo ter **valores diferentes** dependendo da aplicação, enquanto **SCFM** é o volume ajustado pela **lei dos gases ideais**, tendo um **valor fixo** (padrão) para pressão e temperatura. Esses valores são 1 Atm (14,7 psia) e 60°F, respectivamente, para **unidades inglesas** ou 1,013 bar e 0°C se for em **unidades métricas** e a unidade de vazão em Nm³/h. Desta forma, independentemente da temperatura de aplicação, acima ou abaixo do valor padrão de 60°F (520°R) ou 0°C (273K), a área final selecionada do bocal da válvula de segurança será a mesma para o mesmo volume e pressão de ajuste nas condições reais. Isto significa que os valores (volumes) **tabelados** pelos **fabricantes** são **fixos**, enquanto que os valores encontrados nos processos poderão ser diferentes, principalmente em relação à sua **temperatura**, já que esta pode mudar, mas a **pressão de ajuste**, tanto nas **tabelas** quanto nas **condições reais** serão as **mesmas**.

A temperatura utilizada nos cálculos envolvendo gases, incluindo os cálculos de conversão de unidades de vazão e capacidade de vazão, deve sempre estar em **unidades absolutas**. Por exemplo, em Rankine (°R) para **unidades inglesas** ou em Kelvin (K) para as **unidades métricas**, para valores de temperatura diferentes daqueles das condições padrão ou normal, respectivamente, seja abaixo ou acima.

Na escala Kelvin, 0°C equivalem a 273K, enquanto que na escala Rankine a **temperatura absoluta** é 460°R que equivalem a 0°C ou 32°F. Assim, nos cálculos de conversão de vazão, em unidades métricas, a **temperatura real** em °C deve ser somada a 273 para se obter o **valor absoluto** em Kelvin. Quando o cálculo for feito em **unidades inglesas** deve-se primeiramente transformar o valor de °C em °F ((°C x 1,8) + 32) e com este novo valor somar aos 460°R antes de sua inclusão na fórmula.

Quando esse volume é medido nas **condições reais de compressão**, ou seja, pressão e temperatura reais do processo, aquele volume é denominado de **volume efetivo**. O usuário deve sempre referenciar a que condições de pressão e temperatura, além de referenciar (se ele quiser) a umidade relativa e a pressão de vapor, aquele volume foi determinado. Nas tabelas de capacidade de vazão publicadas pelos fabricantes de válvulas de segurança, os valores estão sempre referenciados nas condições “padronizadas” ou “normalizadas”, ou seja, em SCFM ou Nm³/h, respectivamente. Aqueles são os valores médios obtidos nos testes de laboratório do NBBI.

ACFM (Actual Cubic Feet Minute) ou apenas **CFM** – Este é o volume de um gás, em pés³/min, escoando por um sistema sob condições **reais** de pressão, temperatura, umidade relativa e pressão de vapor. A quantidade de fluido que escoar através de uma válvula, incluindo as válvulas de segurança, está sempre em valores **reais**. As unidades padronizadas ou normalizadas (SCFM ou Nm³/h, respectivamente) são apenas para os **cálculos** de dimensionamento, inclusão na **plaqueta** da válvula e **publicação** nos catálogos dos fabricantes para a seleção da válvula pelo próprio usuário. Se no sistema por onde o gás está escoando, coincidentemente, ocorre sob condições padronizadas de pressão e temperatura (1 Atm e 60°F), respectivamente, e umidade relativa de 0%, (por exemplo, na entrada de um compressor), então **ACFM** e **SCFM** serão a mesma coisa. Infelizmente, isto normalmente não é o caso quando a mais importante mudança entre essas duas definições é a pressão. Para que um gás possa se movimentar por um sistema, uma **pressão positiva** ou um **vácuo** (pressão negativa) deve ser produzido. Quando uma pressão positiva é gerada sobre um volume padrão (fixo) de um gás, este é **comprimido**. Por outro lado, quando uma pressão negativa (vácuo) é produzida sobre um **volume padrão** de um gás, este se **expande**. O valor em ACFM, CFM ou em m³/h, por exemplo, é aquele liberado por um compressor nas **condições reais** de processo, podendo variar com os valores de pressão, temperatura, umidade relativa e pressão de vapor na entrada deste e de acordo com a atmosfera local e altitude em relação ao nível do mar. A **condição padrão** (SCFM) e a **condição real** (CFM) estão relacionadas à **densidade do gás** ou ar (reais) com sua **densidade** nas **condições padronizadas**.

Sendo que o que muda da **condição real** para a **condição padrão** é a **temperatura** na qual **altera o volume** de um gás, a **conversão** da condição real para a **condição** “padrão” ou “normal” se torna obrigatória, pois não há uma constante para multiplicação ou divisão. Mas, o usuário pode converter as unidades de métrica para inglesa e vice-versa, de forma bastante aproximada, através das seguintes constantes: Para converter de Nm³/h para SCFM **divida** por 1,6302 ou **multiplique** por este valor se quiser

converter de SCFM para Nm³/h. A precisão nesta conversão só não é absoluta devido às diferenças de temperatura entre as duas unidades.

Como o valor em SCFM publicado pelos fabricantes, ou estampado na plaqueta de suas válvulas de segurança operando com ar comprimido, foi determinado sob temperatura de 60°F, o usuário pode corrigir sua capacidade de vazão quando operando com outra temperatura diferente daquela. Basta multiplicar o valor em SCFM pelo fator de correção Kt que aparece na tabela 4 abaixo de acordo com a temperatura operacional:

°F	Kt	°F	Kt	°F	Kt	°F	Kt
0	1,063	90	0,972	260	0,850	440	0,760
10	1,052	100	0,964	280	0,838	460	0,752
20	1,041	120	0,947	300	0,827	480	0,744
30	1,030	140	0,931	320	0,816	500	0,737
40	1,020	160	0,916	340	0,806	550	0,718
50	1,010	180	0,901	360	0,796	600	0,701
60	1,000	200	0,888	380	0,787	650	0,685
70	0,991	220	0,874	400	0,778	700	0,669
80	0,981	240	0,862	420	0,769	750	0,656

Tabela 4: extraída do catálogo da APOLLO VALVES (Válvulas de Segurança e/ou Alívio).

Observação: Geralmente essa informação (capacidade de vazão) é **estampada na plaqueta e publicada nos catálogos** para as válvulas de segurança que **possuem o selo (UV) do ASME**, isto é, aquelas que tiveram suas capacidades de vazão **testadas e certificadas** nos laboratórios credenciados pelo ASME. Este código requer que uma válvula aplicada para operar com qualquer gás seja marcada em sua plaqueta a unidade de vazão em **SCFM de ar** (lbs/min de ar; ou unidades métricas também são permitidas). Estas unidades são requeridas para propósito de **padronização da vazão**. O **valor de capacidade estampada e publicada** é do fluido (ar comprimido, água e vapor d'água saturado), conforme os **testes de laboratório** descritos no ASME. Somente esses fluidos são utilizados para os **testes de certificação de capacidade de vazão** das válvulas de segurança e/ou alívio.

O fabricante pode também marcar estas unidades do fluido em **serviço real** para outros gases **diferentes do ar** (amônia, argônio, pentano, etc) quando requisitado pelo usuário, porém, esta segunda capacidade de vazão **não é requerida** pelo código. Esta segunda capacidade é usualmente publicada sobre uma **segunda plaqueta**. Os **procedimentos descritos** na Seção VIII do código ASME, **Apêndice 11** também podem ser usados para determinar esta **capacidade de vazão adicional**.

DIMENSIONANDO a ÁREA do BOCAL

A mínima área do orifício do bocal requerida pelo processo é calculada a partir de parâmetros baseados nas condições do fluxo na **entrada** da válvula de segurança. A pressão do fluido na entrada da válvula, quando aberta e descarregando gases e vapores, é a denominada **pressão de alívio**.

Para o cálculo da área de passagem do bocal, a **taxa de fluxo requerida** pelo processo, obrigatoriamente, deve estar convertida para a condição “padrão” ou “normal”. As equações para o cálculo da área de passagem também devem estar em **unidades inglesas** ou **métricas**, respectivamente.

O dimensionamento de válvulas de segurança que serão aplicadas tanto com **gases** quanto com **vapores** pode determinar a capacidade de vazão em **massa** ou em **volume**.

As equações utilizadas para esses tipos de fluidos são baseadas nas leis dos gases perfeitos, isto é, o **gás não ganha e nem perde calor**. Portanto, a **energia de expansão** é convertida em **energia cinética** (velocidade de escoamento).

Existem alguns erros que são cometidos quando se deseja dimensionar a área de passagem do bocal de uma válvula de segurança sem antes converter as unidades de vazão de CFM ou PCM (pés cúbicos por minuto) para SCFM e vice-versa, o mesmo de Nm³/h para m³/h e vice-versa.

Os **principais erros** são:

- Usar a **condição real** sem nenhuma correção, comparando seu valor **diretamente** com as tabelas de capacidade de vazão **publicadas** pelos fabricantes;
- Usar CFM como SCFM ou m³/h no lugar de Nm³/h nas equações de dimensionamento;
- Não montar a equação de forma correta, invertendo e/ou misturando os valores e/ou unidades de pressão, volume e temperatura.

O API Std 526 publica os valores de **áreas padronizadas** dos **14 orifícios** de “D” a “T” (0,110 pol² a 26 pol², respectivamente). Estes são valores utilizados apenas para cálculos **preliminares**. O usuário deve utilizar a **área real publicada** pelo fabricante para calcular a **máxima capacidade de vazão** da válvula selecionada. A tabela 5 abaixo (elaborada pelo autor) mostra os respectivos tamanhos, dos orifícios e valores de **área efetiva**, padronizados pelo API Std. 526, além das combinações de **bitolas de entrada e de saída**.

Tamanho da Válvula	Orifício	Área Efetiva pol ²	Área efetiva mm ²	Diâmetro
1" x 2"	D	0,110	71	9,5 mm
1" x 2"	E	0,196	127	12,7 mm
1.1/2" x 2"	F	0,307	198	15,9 mm
1.1/2" x 2.1/2"	G	0,503	324	20,3 mm
1.1/2" x 3"	H	0,785	507	25,4 mm
2" x 3"	J	1,287	830	32,5 mm
3" x 4"	K	1,838	1182	38,8 mm
3" x 4"	L	2,853	1840	48,4 mm
4" x 6"	M	3,6	2324	54,4 mm
4" x 6"	N	4,34	2800	59,7 mm
4" x 6"	P	6,38	4117	72,4 mm
6" x 8"	Q	11,05	7133	95,3 mm
6" x 8"***	R	16	10323	114,6 mm
8" x 10"	T	26	16774	146,1 mm

Tabela 5: Valores de áreas (em pol²) dos bocais padronizadas conforme API Std. 526.

OBS:** As válvulas de segurança nas quais a **capacidade de vazão requerida** pelo processo **exige** um orifício "R" (16 pol²) e cuja pressão de ajuste é **a partir** de 100 psig (6,89 barg) devem ter o **flange de saída** na bitola de **10"** na Classe 150 e o **flange de entrada** na bitola de 6" na **Classe 300**.

Nas equações que utilizamos para os cálculos de dimensionamento de válvulas de segurança, válvulas de controle automáticas, etc., as unidades de vazão estão “padronizadas” ou “normalizadas” em SCFM ou Nm³/h, respectivamente. Para que o resultado do cálculo possa estar correto, é preciso antes converter a vazão “real” seja em pes³/min (CFM), pes³/h (CFH), m³/h ou m³/min para vazão padronizada (SCFM ou SCFH) ou normalizada (Nm³/h ou Nm³/min).

Observação: As unidades em SCFH ou Nm³/h são muito aplicadas para os cálculos de dimensionamento (**cálculo do CV**) de válvulas de controle automáticas.

As equações 7 e 8 mostram como encontrar a **área mínima requerida** após a taxa de fluxo requerida pelo processo ter sido **convertida** para a condição **padrão** (em SCFM) ou **normal** (em Nm³/h), respectivamente:

Equação 7

$$A = \frac{SCFM \cdot \sqrt{G \cdot T \cdot Z}}{1,175 \cdot C \cdot Kd \cdot P \cdot Kb}$$

Equação 8

$$A = \frac{Nm^3 / h \cdot \sqrt{M \cdot T \cdot Z}}{22,42 \cdot C \cdot Kd \cdot P \cdot Kb}$$

O usuário também pode converter as condições reais de unidade métrica para inglesa e vice-versa utilizando primeiramente as equações 3 e 4, antes de padronizar ou normalizar a vazão mínima requerida e aí sim calcular a área mínima de passagem requerida para o bocal de acordo com a equação desejada. Com essa área o usuário pode selecionar a área final e calcular a capacidade de vazão efetiva (máxima) pela válvula nas condições padronizadas ou normalizadas. A área selecionada deverá ser aquela imediatamente **superior à área mínima** requerida, encontrada no cálculo. Com a área selecionada o usuário pode também calcular a capacidade de vazão nominal nas condições padronizadas ou normalizadas. A partir deste resultado ele pode fazer a “reconversão” daquelas condições e encontrar a capacidade de vazão **efetiva** nas **condições reais** de processo.

Os valores reais encontrados na prática normalmente são **iguais** ou **maiores** que os valores **nominais** de vazão através das áreas de bocais publicados pelo API Std. 526. Este API **define** e **padroniza** também as dimensões de centro a face para aquelas válvulas de segurança e alívio que serão utilizadas para proteger tubulações ou vasos de pressão construídos conforme o código ASME Seção VIII – Divisão 1, além de padronizar também a temperatura máxima de operação; limite de contrapressão para as válvulas convencionais e balanceadas (incluindo as válvulas piloto operadas); materiais de construção para corpo, castelo, fole e mola. Sendo assim, o usuário pode substituir sua válvula sem a necessidade de recorrer ao mesmo fabricante.

Observação: A capacidade de vazão das válvulas de segurança operando com ar comprimido ou outros gases pode ser dada em **unidades de massa** (kg/h ou lbs/h) ou **unidades volumétricas** (pés³/min, m³/h, lts/min, etc). Geralmente, os fabricantes **publicam** seus valores em **unidades volumétricas**. A capacidade de vazão em **unidades de massa** é comumente publicada quando o fluido é **vapor d’água saturado**. Na publicação da capacidade de vazão para **gases** o fluido de referência é o **ar comprimido**. Se a válvula for utilizada para algum outro gás que não seja o ar comprimido, deverão ser feitos ajustes na densidade do gás em relação à densidade do ar, além do peso molecular, e calores específicos (Constante “C”).

Com a equação 9, mostrada abaixo, é possível se determinar a **capacidade de vazão nominal (em SCFM)** de uma válvula de acordo com a área selecionada, em **pol²**. Com a equação 10 mostrada na sequência é possível determinar a **capacidade de vazão nominal (em Nm³/h)** de uma válvula de segurança de acordo com a área selecionada, desta vez em **mm²**. Os valores de áreas nominais, tanto em **pol²**, quanto em **mm²**, aparecem na tabela 4 acima.

Equação 9

$$SCFM = \frac{1,175 \cdot C \cdot A \cdot P \cdot Kd \cdot Kb}{\sqrt{GTZ}}$$

$$Nm^3/h = \frac{22,42 \cdot P \cdot C \cdot A \cdot Kd \cdot Kb}{\sqrt{M \cdot T \cdot Z}}$$

Equação 10

Nomenclaturas utilizadas nas equações 7, 8, 9 e 10:

A = área mínima requerida, em pol² na unidade inglesa (equações 7 e 9) ou mm² na unidade métrica (equações 8 e 10). A área final a ser selecionada é a próxima área maior mostrada na tabela 4;

SCFM = Vazão máxima do gás pela área do bocal selecionada nas condições padronizadas;

P = pressão de alívio em **unidades absolutas**, (pressão de ajuste, em **psig** + 10% de sobrepressão + pressão atmosférica de 14,7 **psia**) **somente** para as **equações 7 e 9**. Para as **equações 8 e 10**, a pressão de alívio (valor de “P”) deverá ser: a pressão de ajuste, em **barg** + 10% de sobrepressão + **1,013 bara** (bar absoluta) de pressão atmosférica;

C = coeficiente dos calores específicos do gás (adimensional). Ele é baseado na relação dos calores específicos do gás ou vapor nas **condições padronizadas** de pressão e temperatura. Ele varia de acordo com o tipo de fluido e a equação utilizada, se inglesa ou métrica. Por exemplo, para um fluido como o ar comprimido o valor deste coeficiente em **unidades inglesas** é **356**, enquanto que em **unidades métricas** é **2,703**. Quando o valor “C” do gás em questão não for conhecido, ele poderá ser substituído por 315 ou por 2,390 se a equação estiver em unidades métricas, obtendo-se assim um valor bastante conservador;

Kd = coeficiente de descarga, 0,975 (adimensional). Este valor é sugerido pelo API Std. 520 Parte 1. Alguns fabricantes possuem valores específicos que foram **testados** e **comprovados**, sendo por eles publicados;

Kb = fator de correção de acordo com a tabela 6 para **válvula convencional** operando sob condições de **fluxo subcrítico**;

G = densidade do ar, 1,0 (adimensional);

M = peso molecular do gás (adimensional) de acordo com a tabela 6;

T = temperatura do gás, em °F + 460 (°R) na unidade inglesa; ou 273 + °C (em Kelvin) na unidade métrica;

Z = fator de compressibilidade = 1,0 (adimensional).

Observação: Quando o usuário tem somente a **densidade (“G”) do gás**, ele deve usar as equações 7 e 9, para encontrar a **área mínima requerida** e a **capacidade de vazão nominal**, respectivamente. Quando ele tem somente o **peso molecular do gás** e não sua densidade, ele deve utilizar as equações 8 e 10. Ele poderá também utilizar as equações 14 e 15 na página 26, quando apenas o **peso molecular** for conhecido.

Observação: Poucos gases se comportam como gases perfeitos quando eles se aproximam de seu ponto de saturação. O coeficiente “C” e o fator de compressibilidade “Z” **corrigem** os **desvios dos gases reais** em relação aos **gases ideais** (perfeitos).

A equação para determinação da capacidade de vazão de um fluxo de gás através de uma válvula de segurança é derivada da lei geral dos gases perfeitos na qual é admitido que o fluxo é **adiabático** e irreversível. Portanto, considera-se que o gás não ganha e nem perde calor quando é descarregado pela válvula, além de que sua energia de expansão é convertida em energia cinética (velocidade de escoamento do gás). Poucos são os gases que tem esse comportamento e o desvio a partir da lei dos gases perfeitos torna-se ainda maior quando ele se aproxima das condições de saturação. Esse desvio é corrigido através do fator de compressibilidade “Z” que veremos mais a frente.

Toda válvula de segurança e/ou alívio quando dimensionada para a proteção de algum equipamento, seja uma caldeira, um vaso de pressão, um compressor, etc. deverá sempre ser selecionada aquela que tenha uma capacidade de vazão **igual** ou **superior** à **vazão requerida** por aquele equipamento a ser protegido. No caso de gases, tais como, ar comprimido, amônia (NH₃), nitrogênio (N₂), entre outros de uso comum numa indústria, são pressurizados através de compressores.

Na determinação da **mínima** área do bocal requerida, a massa de fluxo **máxima** que pode ser enviada ou produzida pelo processo deve ser conhecida. No cálculo para gases em **unidades volumétricas**, o resultado dos cálculos considera essa em valores “padronizados” ou “normalizados”, mas o valor do volume que o usuário obtém no processo está em valores **reais** de pressão, temperatura, umidade relativa e pressão de vapor.

Muito cuidado deve ser tomado ao dimensionar válvulas de segurança em relação ao volume máximo enviado pelo processo para que sejam evitados erros que podem resultar em superdimensionamento ou subdimensionamento da área de passagem do bocal. Esse volume **não pode ser inferior a 30%** (válvula superdimensionada) ou **superior a 100%** (válvula subdimensionada), respectivamente, da capacidade de vazão efetiva da válvula. Quando uma válvula de segurança operando com qualquer fluido compressível está **superdimensionada**, ela pode trepidar demasiadamente durante o ciclo operacional (abertura, sobrepressão e fechamento) podendo se autodestruir, devido aos danos causados nas superfícies de vedação, fadiga da mola, fadiga do fole (nas balanceadas), desgastes no sistema de guia, afrouxamento dos parafusos e porcas de fixação, etc. Essa trepidação é um fenômeno operacional que ocorre durante o ciclo operacional da válvula de segurança sendo denominado de *chattering* (**batimento**) e podendo, posteriormente, causar vazamentos mesmo na pressão de operação normal, além de abertura prematura.

Quando a área final a ser selecionada estiver muito acima da área mínima requerida, o usuário pode optar por selecionar duas ou mais válvulas de **orifícios menores** e com **ajustes** em valores **escalonados**. O ajuste de pressões escalonado permite que o desperdício de fluido seja minimizado a cada operação da válvula de segurança, impede a interação entre as válvulas, além de evitar o fenômeno do *chattering*. Por exemplo, se a capacidade de vazão requerida pelo processo é de 3100 m³/h (1800 pés³/min), de nitrogênio, com 10 barg (145 psig) de pressão de ajuste e 35°C (95°F), fazendo-se as conversões necessárias para padronizar a vazão, a mínima área requerida deverá ser de 6,62 pol² com uma vazão efetiva de 19990,2 SCFM. Porém, a próxima área a ser selecionada deveria ser de 11,05 pol² (orifício “Q”), com esta área a vazão efetiva seria de 33329,4 SCFM. Mas, o usuário pode selecionar duas válvulas orifício “M” (3,6 pol²), onde as bitolas de entrada e saída, além do fluido desperdiçado durante o alívio pela válvula, serão menores. Uma válvula pode ser ajustada com 145 psig e a segunda válvula com 152 psig (10,48 barg). A **primeira válvula** irá permitir uma vazão efetiva de 10588,44 SCFM, enquanto a **segunda válvula** irá permitir a vazão de 11404,35 SCFM. Somando-se a capacidade de vazão de ambas as válvulas, teremos uma vazão efetiva de 21992,79 SCFM o que vem a ser bem inferior à capacidade de vazão de uma válvula orifício “Q”, mostrada inicialmente.

Com esta escolha os custos com a instalação da válvula de segurança, incluindo os suportes das tubulações de entrada e de saída, e posterior inspeção e manutenção, também serão menores. Isto porque ao invés de instalarmos uma única válvula com conexões 6” x 8”, serão instaladas duas válvulas com conexões de 4” x 6”. Nessas situações é recomendado, sempre que possível, a especificação de válvulas do mesmo fabricante, modelo, tamanho e orifício a fim de minimizar os custos com o estoque de peças sobressalentes. As válvulas de segurança que operam com gases e vapores devem ser especificadas com sede resiliente de acordo com a pressão de ajuste, área do bocal e temperatura do fluido.

Quando a máxima taxa de fluxo que pode ser liberada por um processo ou equipamento é dividida por duas ou mais válvulas de segurança e com ajustes escalonados, o efeito *chattering* não ocorre. Nos valores numéricos deste exemplo, se as válvulas estiverem protegendo um vaso de pressão construído conforme a norma ASME Seção VIII, Divisão 1, e a PMTA deste vaso for também de 145 psig, a segunda válvula deverá ser ajustada, no máximo, em 152 psig, ou seja, em 5% acima da PMTA, conforme determina o ASME.

Por outro lado, o **subdimensionamento** pode comprometer a função de uma válvula de segurança no processo. Num exemplo prático, se um compressor gera 450 CFM (pés³/min **real**) de ar a 100 psig de pressão e temperatura de 40°C e a válvula de segurança selecionada também tiver uma capacidade de vazão tabelada pelo fabricante num valor **igual** ou **maior** que 450 SCFM (repare as diferenças nas duas unidades de volume), esta não será suficiente para liberar toda a taxa de fluxo produzida pelo compressor, por

exemplo, se uma **válvula de bloqueio** na saída deste for **inadvertidamente fechada** (descarga bloqueada). Quando uma válvula de segurança não permite a descarga completa da vazão enviada pelo compressor, a pressão dentro do equipamento protegido pode aumentar acima dos limites previstos, além de não permitir seu fechamento acima da pressão normal de operação (tendo longo diferencial de alívio), causando transtornos ao processo. Neste exemplo, a válvula selecionada **erroneamente** é de **1” x 2”, orifício “D”** (0,110 pol²). Sendo que se fosse feita a conversão corretamente, a válvula **corretamente** selecionada deveria ser de **3” x 4”, orifício “K”** (1,838 pol²), pois a área mínima requerida para atender a vazão desta aplicação de **450 pés³/min (3519,6 SCFM)**, e convertida posteriormente para as condições padronizadas antes de calcular a área de passagem, isto é, a área mínima requerida para esta aplicação, deveria ser de **1,643 pol²**. Este erro significaria instalar uma válvula cuja área de passagem final seria quase **17 vezes menor** que a área correta!

Na tabela 6 abaixo estão listados os principais dados de diversos gases para auxiliar o usuário no dimensionamento de válvulas de segurança. Esta tabela só deve ser aplicada nos cálculos em unidades inglesas:

Gás ou Vapor	Peso Molecular	Calores Específicos (k) (14,7 psia e 60°F)	Coefficiente “C”	Gravidade Específica	Pressão Crítica (psia)	Temperatura Crítica (°R) (°F + 460)
Acetileno	26,04	1,25	342	0,899	890	555
Ar	28,97	1,40	356	1,000	547	240
Amônia	17,03	1,30	347	0,588	1638	730
Argônio	39,94	1,66	377	1,379	706	272
Benzeno	78,11	1,12	329	2,696	700	1011
N-Butano	58,12	1,18	335	2,006	551	766
Iso-Butano	58,12	1,19	336	2,006	529	735
Dióxido de Carbono	44,01	1,29	346	1,519	1072	548
Monóxido de Carbono	28,01	1,40	356	0,967	507	240
Cloro	70,90	1,35	352	2,447	1118	751
Álcool Etilico	46,07	1,13	330	1,590	926	925
Etileno	28,03	1,24	341	0,968	731	509
Freon 11	137,37	1,14	331	4,742	654	848
Freon 12	120,92	1,14	331	4,174	612	694
Freon 22	86,48	1,18	335	2,985	737	665
Freon 144	170,93	1,09	326	5,900	495	754
Helio	4,02	1,66	377	0,139	33	10
N-Heptano	100,20	1,05	321	3,459	397	973
Hidrogênio	2,02	1,41	357	0,070	188	60
Metano	16,04	1,31	348	0,554	673	344
Gás Natural	19,00	1,27	344	0,656	671	375
Nitrogênio	28,02	1,40	356	0,967	493	227
Oxigênio	32,00	1,40	356	1,105	737	279
Óxido Nítrico	30,00	1,40	356	1,036	956	323
Óxido Nitroso	44,02	1,31	348	1,520	1054	557
N – Pentano	72,15	1,08	325	2,491	490	846
Iso - Pentano	72,15	1,08	325	2,491	490	829
Propano	44,09	1,13	330	1,522	617	666
Tolueno	92,13	1,09	326	3,180	611	1069

Tabela 6: Valores de referência para o cálculo de diversos gases de uso comum na indústria.

Observação: Os valores para o fator “k” mostrados nesta tabela foram determinados sob condições padronizadas de pressão e temperatura, isto é, pressão atmosférica (1 atm) e 60°F (15,56°C), respectivamente.

Os valores para o coeficiente “C” mostrados acima na tabela 6 também podem ter seus valores calculados através da **equação 11 (unidades inglesas)** ou **equação 12 (unidades métricas)**, conforme são mostradas abaixo. Essas equações relacionam a razão dos calores específicos (fator k do gás) com o valor de seu coeficiente “C”. Ambos também podem ser vistos na tabela 6 de acordo com cada gás:

$$C = 520 \cdot \sqrt{k \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad \text{Equação 11}$$

$$C = 3,948 \cdot \sqrt{k \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad \text{Equação 12}$$

Quando o usuário especifica a válvula diretamente com o fabricante para aplicação com ar comprimido e outros gases, ele deve passar todos os dados do fluido (nome, pressão, temperatura, máxima taxa de fluxo requerida pelo processo, pH, além de umidade relativa e pressão de vapor), tanto para **dimensionamento** quanto para **especificação dos materiais de construção** do corpo, castelo, mola e demais componentes internos, além da especificação da classe de pressão do flange de entrada. Com os dados reais do processo passados pelo usuário, o fabricante obrigatoriamente deverá fazer os cálculos de conversão para encontrar a **máxima taxa de fluxo requerida** nas condições padronizadas ou normalizadas, e com este valor, a **área mínima** e selecionar o próximo **orifício maior** para a **vazão requerida**. Com o orifício selecionado, o fabricante poderá encontrar a capacidade de **vazão nominal** para as condições padronizadas ou normalizadas e também para as condições **reais**, em pés³/min ou em m³/h.

O executante dos cálculos deve ficar atento para não confundir as relações entre **pressão e temperatura** nas condições reais e padrão (ou normal) em relação ao **volume** real e padrão (ou normal), além das unidades em psig, barg, °F e °C. O volume de um gás qualquer é diretamente proporcional à sua temperatura absoluta estando sob pressão constante. Portanto, um aumento na temperatura produz um aumento no volume, contudo, uma área maior do bocal precisa ser selecionada. Sendo que as grandezas, volume e temperatura, são diretamente proporcionais, o resultado da divisão entre elas será uma constante.

A densidade do gás também influencia no resultado do cálculo, pois para duas aplicações com o mesmo volume inicial requerido para a mesma pressão, temperatura, coeficiente “C” e área final selecionada, para aquele gás que tiver **maior densidade**, a área mínima requerida será **maior**, enquanto que a capacidade de vazão efetiva será **menor**. Em outras palavras, com o **aumento da temperatura** e, conseqüentemente, a **redução na densidade do gás**, a capacidade de vazão efetiva da válvula de segurança vai ficando cada vez **menor** para o mesmo orifício selecionado, isto é, ela vai permitindo a vazão cada vez **menor de fluido** para uma **densidade menor**. Este comportamento dos gases em relação à capacidade de vazão efetiva devido à densidade também é válido para o escoamento de líquidos através de válvulas de alívio.

Com o **aumento** da temperatura e, conseqüentemente, **redução** da densidade, para um volume e pressão de ajuste, fixos, a área mínima requerida inicial **umenta** e a capacidade de vazão nominal da área final selecionada torna-se **menor**. Com a **redução** da temperatura e, conseqüente, aumento da densidade para o mesmo volume inicial e pressão de ajuste, a área mínima requerida **diminui**, conseqüentemente, a capacidade de vazão nominal para a área final selecionada torna-se **maior**. Com o **aumento** da temperatura o volume também **umenta**, porém, com isto a **área mínima requerida** para o bocal da válvula será **maior**. O volume dos líquidos e gases muda com a temperatura. Desta forma, a taxa de fluxo, pelo orifício do bocal selecionado, numa determinada temperatura (em **maior valor**) será **menor** do que se esta mesma taxa de fluxo for medida em outra temperatura (de **menor valor**).

Assim como qualquer variação na **temperatura do gás altera seu volume**, este também é alterado com qualquer variação na **densidade**. A densidade aumenta ou diminui com a redução ou aumento da temperatura, respectivamente. A **densidade** também **aumenta** ou **diminui** com o **aumento** ou **redução** da **pressão**, respectivamente. Isto significa que com o aumento da temperatura a densidade diminui, mas com o aumento da pressão a densidade também aumenta. Para um volume fixo de gás, a área mínima requerida aumenta com o aumento da temperatura e, conseqüentemente, redução da densidade. Apenas com a variação na densidade e temperatura, para o mesmo volume inicial e pressão de ajuste, ocorrerá que a área final selecionada terá orifícios diferentes.

Se o volume aumenta com o aumento da temperatura, a área final selecionada não poderá ser a mesma. A válvula que trabalha com ar comprimido a **25°C** terá a área mínima requerida **menor** do que aquela que trabalha com **40°C** para o **mesmo volume de ar** (padrão ou normal). Por outro lado, considerando-se a área final selecionada, aquela que trabalha a **25°C** terá uma **capacidade de vazão efetiva maior** do que aquela que trabalha com **40°C**. Se a pressão de ajuste da válvula de segurança for **reduzida**, a área mínima **requerida** será maior e a capacidade de vazão **efetiva**, para o mesmo orifício **selecionado**, no exemplo anterior, será ainda **menor**, devido ao **aumento de volume** causado pela **redução da pressão**.

Portanto, considerando-se pressão de ajuste e volume iniciais fixos, **umentando-se** a temperatura de um fluido (gases e vapores) **aumenta-se** também a área mínima requerida. **Aumentando-se** a densidade (tanto para gases e vapores quanto para líquidos) **aumenta-se** também a área mínima requerida. Com isto, a área final selecionada permitirá **menor** vazão.

CONDIÇÕES de FLUXO CRÍTICO e de FLUXO SUBCRÍTICO

Toda válvula de segurança **estilo convencional**, operando com fluido compressível, muitas vezes é utilizada em aplicações sujeitas à **contrapressão superimposta constante** nas quais são até mais apropriadas do que as válvulas de segurança **balanceadas com fole**. Não só pelo custo destas ser maior, mas até mesmo pelas **limitações de pressão** às quais o fole está sujeito. As **válvulas convencionais** podem ser aplicadas para condições de contrapressão superimposta constante com valores que podem chegar até 70% da pressão de ajuste, dependendo do tamanho do orifício da válvula e pressão de ajuste. Para valores maiores devem ser selecionadas válvulas de segurança piloto-operadas. Assim, uma válvula de segurança convencional operando com algum fluido compressível e ajustada com 100 psig, por exemplo, pode operar com uma contrapressão superimposta constante de até 70 psig. Se fosse uma **válvula de segurança balanceada com fole**, a máxima contrapressão permitida é de aproximadamente 40% da pressão de ajuste, dependendo do tamanho da área do bocal e do valor da própria pressão de ajuste. O menor limite no valor da contrapressão é dado para evitar fadiga do fole devido às variações no valor da própria contrapressão e da temperatura.

Quando a descarga da válvula de segurança ocorre para um **sistema fechado**, dizemos que tal sistema é dotado de **contrapressão superimposta** podendo esta ser dos tipos **constante** ou **variável** e as válvulas de segurança e alívio a serem aplicadas deverão ser dos tipos: **convencional** ou **balanceada**, respectivamente. Seu efeito na operação de uma válvula de segurança deve ser avaliado e seu valor mensurado. Dependendo do valor ele pode influenciar negativamente na operação e na capacidade de vazão efetiva (máxima) da válvula de segurança. Quando influencia, um fator de correção (fator Kb) deve ser utilizado.

O fator de correção Kb só é utilizado em válvulas de segurança **convencionais** ou nas válvulas de segurança e alívio **piloto operadas** cuja contrapressão superimposta constante possa ser **superior** à condição de **fluxo crítico**, ou nas **balanceadas** quando o valor da **contrapressão superimposta variável** é **superior** a 20% da pressão de alívio absoluta medida na entrada da válvula de segurança, sendo limitada a aproximadamente 40% da pressão de ajuste; para esta última depende da área do orifício e do valor da pressão de ajuste.

A condição de **fluxo crítico** é aquela na qual qualquer valor de contrapressão **não altera** a capacidade de vazão **nominal** da válvula. Sendo assim, por exemplo, o valor de capacidade de vazão publicado e estampado na plaqueta da válvula pelo fabricante não é alterado quando ela está operando sob condições de fluxo crítico. Quando operando sob condições de **fluxo subcrítico**, aquela capacidade de vazão vai sendo materialmente reduzida com o aumento da contrapressão. Sob estas condições, a contrapressão

superimposta constante atua como uma **barreira física** contra o fluxo vindo do equipamento protegido e da garganta do bocal da válvula.

A **contrapressão superimposta constante** é assim denominada quando a descarga da válvula de segurança ocorre para dentro de um coletor que está **constantemente pressurizado** e não há nenhuma **variação** considerável em seu valor **imediatamente antes** da abertura da válvula da segurança. Mesmo quando uma válvula de segurança estilo **convencional** descarrega diretamente para a atmosfera, a pressão atmosférica atuando **sobre o suporte do disco** e os demais **componentes internos** é considerada uma contrapressão superimposta **constante**.

Se o fluido for, por exemplo, ar comprimido, oxigênio ou nitrogênio, uma contrapressão superimposta constante de até **52,8 % da pressão de alívio absoluta na entrada da válvula** de segurança não altera sua capacidade de vazão **nominal**. Esta condição de escoamento é denominada de fluxo crítico e **nenhum fator de correção** se faz necessário no cálculo de dimensionamento da área do bocal, se esta for uma válvula de segurança estilo **convencional**. Em outro exemplo, se uma válvula de segurança estilo convencional operando com **ar comprimido** possui uma pressão de alívio absoluta (pressão de ajuste + sobrepressão de 10% + pressão atmosférica) de 399,7 psia (28,10 kgf/cm²) e com uma contrapressão superimposta constante absoluta de 211,3 psia (14,85 kgf/cm²) ou menor, tanto a **capacidade de vazão efetiva** quanto a **velocidade sônica** (331,46 m/s) na **saída da garganta do bocal** são **alcançadas simultaneamente** e **não são influenciadas** pela contrapressão. Se o valor da contrapressão for superior a 211,3 psia (para este exemplo de pressão de alívio e tipo de fluido), tanto a **capacidade de vazão efetiva** quanto a **velocidade sônica** começam a ser **reduzidas proporcionalmente** com o **aumento da contrapressão**. Esta condição de escoamento é agora denominada de **fluxo subcrítico**. Para essas condições, agora **se faz necessário** o fator de correção K_b. Este fator irá **corrigir a área do bocal necessária** para essa condição de escoamento e que no final irá resultar numa **área mínima requerida maior** do que aquela necessária caso não houvesse a contrapressão, ou seja, caso o escoamento fosse sob condições de fluxo crítico. Não diferenciar a condição de fluxo, se crítico ou subcrítico, quando uma válvula de segurança estilo convencional é instalada num processo sujeito a **fluxo subcrítico** pode torna-la **subdimensionada**.

A contrapressão superimposta constante sempre **aumenta** o valor da **pressão de ajuste** somente de uma **válvula estilo convencional** na mesma proporção, independentemente do fluxo ser crítico ou subcrítico, ou seja, aquele valor definido na bancada de testes aumenta linearmente com o valor da contrapressão. Por esta razão, a válvula deve ser comprada e calibrada, no exemplo, com 139 psig. Os 211,3 psia de contrapressão superimposta constante, restantes, é que irão **eleva**r a pressão de operação até que esta **alcance** a condição de 350,3 psig (**pressão de ajuste**) e mantenha a segurança do processo. Esta possibilidade deve ser prevista ainda na fase de especificação, dimensionamento e projeto da instalação, devendo ser informada ao fabricante da válvula de segurança no momento da compra.

Teoricamente o fluxo efetivo através da garganta do bocal de uma válvula de segurança, quando sua descarga ocorre diretamente para a atmosfera, em sua máxima capacidade de vazão, alcança um valor constante que corresponde à denominada Pressão de Fluxo Crítico (P_{fc}) para um determinado valor de **pressão de alívio absoluta na entrada**. Desta forma, e sob condições de fluxo adiabáticas*, a capacidade de vazão da válvula é **diretamente proporcional** à pressão de entrada absoluta (Pressão de Alívio Absoluta na entrada).

Observação*: A **transformação gasosa**, na qual o **gás não troca calor** com o meio externo, é denominada de **transformação adiabática**. Ela pode ser de **compressão** ou de **expansão**. No caso das **válvulas de segurança** essa transformação é sempre de **expansão**. Com isso pode-se dizer que nesse tipo de transformação **adiabática**, a **pressão** e a **temperatura diminuem**, enquanto o **volume do gás aumenta**. Nesse tipo de transformação, nenhuma daquelas variáveis mencionadas anteriormente (pressão, volume e temperatura), fica constante. A **transformação isovolumétrica** é também uma **transformação adiabática**. Porém, há troca de calor do gás com o meio externo, mas sem haver variação de temperatura.

Numa válvula de segurança que descarrega **qualquer fluido compressível** num sistema aberto, isto é, a descarga ocorre diretamente para a atmosfera é uma **transformação adiabática de expansão**. Portanto, numa válvula de segurança que descarrega vapor d'água saturado, por exemplo, a temperatura é **reduzida**, seu volume **aumenta** e esse vapor se **condensa**, transformando-se em **água desmineralizada** novamente.

Numa válvula que descarrega algum gás, principalmente em sistemas de descarga abertos, a temperatura também é reduzida, tanto que pode ocorrer o **congelamento do fluido** entre o tubo de saída do vaso de pressão e dentro da garganta do bocal e até **entupimento** desta com **redução** ou até a **total anulação** de sua capacidade de vazão. Podendo também ocorrer dificuldade de vedação, após a operação da válvula ou até travamento do suporte do disco na guia, devido à formação de gelo. Esta formação de gelo durante a descarga através do bocal da válvula pode ocorrer também nas superfícies de vedação e embaixo do suporte do disco em função daquela **redução na temperatura** durante o **processo de alívio**.

Portanto, a condição de **fluxo crítico** existe quando a pressão (P1) na entrada da válvula de segurança é de aproximadamente o **dobro** da máxima contrapressão (P2), quando aquela pressão na entrada da válvula é igual ou maior que 15 psig. Desta forma, sob condições de **vazão sônica** (fluxo crítico), a velocidade de escoamento do gás ou vapor **não é alterada** pela contrapressão mesmo que o valor desta seja reduzido, desde que a pressão de entrada seja mantida num valor fixo, conseqüentemente, a taxa de fluxo através do bocal da válvula de segurança também não é **elevada**. Com isto, a capacidade de vazão de uma válvula de segurança operando sob condições de fluxo crítico só pode ser **elevada, elevando-se a pressão** de entrada ou **reduzindo** o valor da **temperatura** do fluido na **entrada** da válvula.

A equação 13 abaixo pode ser utilizada para determinar se o fluxo é crítico ou subcrítico:

$$P_{cf} = P1 \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

Pcf = pressão de fluxo crítico, em psi;

k = é o coeficiente de expansão isentrópico (adimensional) do gás. Ele é a relação entre os valores específicos do gás sob **pressão constante** e sob **volume constante**. Gases como nitrogênio (N₂), ar comprimido, oxigênio (O₂) e monóxido de carbono (CO), possuem para este coeficiente um valor* adimensional de 1,4 quando medidos sob condições de pressão atmosférica e temperatura padrão de 60°F;

OBS*: O valor de transição de fluxo crítico para subcrítico varia de acordo com o valor do **coeficiente de expansão isentrópico do gás** (fator “k”). Cada gás tem um valor já definido e tabelado. Este valor do coeficiente de expansão varia de acordo com a pressão e temperatura. O valor do fator de correção Kb também varia de acordo com o valor daquele coeficiente de expansão.

P1 = pressão de alívio absoluta na entrada da válvula, em psia (pressão de ajuste + sobrepressão + pressão atmosférica).

A tabela 7 a seguir (Extraída do Manual de Dimensionamento da CROSBY) mostra os valores dos fatores de correção (Kb) para válvulas convencionais que operam sob contrapressão superimposta constante (Pb) e o valor desta excede o valor da pressão de fluxo crítico. Por exemplo, se o valor da divisão da **contrapressão superimposta constante absoluta** (contrapressão + 14,7 psi), se esta for de 180 **psia**, pelo valor da **pressão de alívio absoluta** (P1), se esta for de 300 **psia**, ou seja, uma contrapressão superimposta constante de 60%, (ambos multiplicados por 100), o valor do fator de correção Kb será de 0,995.

Veja o exemplo destacado em negrito na tabela 7 abaixo:

Pb/P1	Kb	Pb/P1	Kb	Pb/P1	Kb
55	1,00	72	0,93	86	0,75
60	0,995	74	0,91	88	0,70
62	0,99	76	0,89	90	0,65

64	0,98	78	0,87	92	0,58
66	0,97	80	0,85	94	0,49
68	0,96	82	0,81	96	0,39
70	0,95	84	0,78		

COEFICIENTE de DESCARGA – (Coeficiente Kd) – Nos cálculos de dimensionamento da área de passagem do bocal (independente do estado físico do fluido) é sempre solicitado na equação um coeficiente de descarga para justificar a influência dos componentes internos, além do acabamento superficial destes, sobre a capacidade de vazão **efetiva** da válvula. Este coeficiente é a **relação** entre a **vazão real** e a **vazão teórica** da válvula. Para fluidos compressíveis o API Std 520 Parte 1 publica um valor adimensional de 0,975. Para as válvulas dimensionadas conforme o código ASME, este valor equivale a 0,878, pois é o valor de 0,975 multiplicado por 0,9. Este valor de 0,9 (coeficiente “K”) é devido à exigência deste código, na qual, a **capacidade de vazão certificada** e publicada nos catálogos e na plaqueta da válvula pelo fabricante deve ser de 90% de sua **capacidade de vazão efetiva** obtida e aprovada nos testes de certificação.

Este coeficiente (K) deve ser utilizado apenas por aqueles fabricantes que tiveram sua capacidade de vazão testada, certificada e aprovada nos laboratórios do NBBI ou algum outro laboratório de testes qualificado pelo código ASME.

Algumas válvulas de segurança que temos no mercado e que irão operar com ar comprimido e gases tiveram essa capacidade certificada com ar comprimido também, porém, numa temperatura fixa de 60°F. Ela pode também ter sido certificada em Nm³/h e sob temperatura de 0°C.

O próprio bocal da válvula de segurança internamente, na maioria dos projetos, além de ser **cônico**, ainda tem um excelente **acabamento superficial**. Essas duas características construtivas lhe permitem aumentar a velocidade de escoamento, evitar a aderência de fluidos e contribuir para aumentar o coeficiente de vazão da válvula, reduzindo a queda de pressão e proporcionando uma redução de pressão ainda mais rápida e segura ao processo.

FATOR de COMPRESSIBILIDADE “Z” – A **lei dos gases ideais** é precisa somente para aplicações em **altas temperaturas e baixas pressões** (mais rarefeito). Para levar em consideração o desvio de um **gás real** para um **gás ideal** é utilizado o fator de compressibilidade “Z” ou como também é conhecido “Fator de Compressibilidade dos Gases”. O valor deste fator é dependente da **pressão crítica e temperatura crítica** para o gás considerado.

O fator de compressibilidade para gases específicos pode ser lido através de gráficos generalizados que colocam “Z” como uma função da **pressão reduzida** numa **temperatura reduzida** constante. A pressão reduzida (**Pr**), é definida como a relação da pressão absoluta (**P1**) real na entrada da válvula para a pressão crítica (**Pc**) termodinâmica absoluta para o fluido, isto é, (**P1/Pc**). A temperatura reduzida (**Tr**) é definida de forma similar (**T1/Tc**). Assim, a temperatura reduzida é igual a relação da temperatura absoluta real do gás na entrada da válvula de segurança para a temperatura crítica absoluta desse gás.

Esse fator é uma indicação de quanto próximo um gás real pode estar de um gás ideal. O valor de “Z” indica então o comportamento de um gás ideal, conforme a equação **PV = nRT**. Seu valor pode raramente ser maior do que 1, podendo ser também inferior a 0,4 quando próximo do **ponto crítico**. Mas para efeito prático ele só é aplicado em pressões de ajuste superiores a 2000 psig (140,6 kgf/cm²), podendo ser encontrado em gráficos específicos.

EXEMPLO REAL de CÁLCULO

Abaixo segue um exemplo real de cálculo onde a taxa de fluxo real (em pés³/min) do processo foi primeiramente **convertida** para a condição **padrão** (em SCFM) e, posteriormente, foram encontradas a **área mínima requerida** pelo processo, e a **capacidade de vazão nominal** de acordo com a **área final selecionada**, ambas em pol².

Dados do fluido:

Fluido: Ar comprimido

Pressão de ajuste: 7,8 kgf/cm² = 7,65 barg = 111 psig

Umidade relativa: 70%

Pressão de vapor: 1,0708 psia

Temperatura: 40°C = 104 °F

Vazão mínima requerida: 600 m³/h = 320,6 CFM = 4484,33 Nm³/h = 2750,78 SCFM

Observação: Devido aos diferentes valores de temperatura de uso industrial dos gases nas **condições reais**, não é possível existir um **fator de conversão** de **m³/h** para **pés³/min** e vice versa. Portanto, para cada valor de temperatura **deveria existir** um diferente valor de fator de conversão.

RESULTADOS:

Área **mínima** requerida: 1,164 pol² (828,44 mm²)

Área **final** selecionada: 1,287 pol² (830 mm²); orifício “J”; (conforme tabela 5)

Capacidade de vazão **nominal** pelo orifício selecionado:

3023,64 SCFM = 354,34 CFM ()

4854,2 Nm³/h = 601,15 m³/h

CÁLCULOS

$$SCFM = 320,6 \cdot \left(\frac{136,8 - (0,7 \cdot 1,0708)}{14,7} \right) \cdot \left(\frac{520}{564} \right)$$

$$SCFM = 320,6 \cdot 9,255 \cdot 0,922$$

$$SCFM = 2735,75$$

$$SCFM = \frac{1,175 \cdot C \cdot A \cdot Kd \cdot P}{\sqrt{GTZ}}$$

$$SCFM = \frac{1,175 \cdot 356 \cdot 1,287 \cdot 0,975 \cdot 136,8}{\sqrt{1 \cdot 564 \cdot 1}}$$

$$SCFM = \frac{71805,4}{23,748}$$

$$SCFM = 3023,64$$

$$CFM = SCFM \cdot \left(\frac{14,7}{P - (0,7 \cdot 1,0708)} \right) \cdot \left(\frac{460 + T}{520} \right)$$

$$CFM = 3023,64 \cdot \left(\frac{14,7}{136,8 - (0,7 \cdot 1,0708)} \right) \cdot \left(\frac{564}{520} \right)$$

$$CFM = 3023,64 \cdot 0,108 \cdot 1,0846$$

$$CFM = 354,34$$

Na seqüência é mostrado o cálculo em **unidades métricas** e com os mesmos dados do processo para o cálculo anterior, no qual é feita primeiramente a **conversão da vazão** requerida pelo processo em m³/h para Nm³/h. Tanto a área mínima requerida quanto a final selecionada estão agora em mm². Os valores da temperatura e da pressão de vapor também foram convertidos para unidades métricas, ou seja, para °C e bar, respectivamente.

$$Nm^3/h = M^3/h \cdot \left(\frac{1,013 + P - (0,7 \cdot 0,0738)}{1,013} \right) \cdot \left(\frac{273}{273 + T} \right)$$

$$Nm^3/h = 600 \cdot \left(\frac{9,43 - (0,7 \cdot 0,0738)}{1,013} \right) \cdot \left(\frac{273}{313} \right)$$

$$Nm^3/h = 600 \cdot 9,258 \cdot 0,8722$$

$$Nm^3/h = 4844,9$$

$$A = \frac{4844,9 \cdot \sqrt{29 \cdot 313 \cdot 1}}{22,42 \cdot 9,43 \cdot 2,703 \cdot 0,975 \cdot 1}$$

$$A = \frac{461589,57}{557,18}$$

$$A = 828,44$$

$$Nm^3/h = \frac{22,42 \cdot 9,43 \cdot 2,703 \cdot 830 \cdot 0,975 \cdot 1}{\sqrt{29 \cdot 313 \cdot 1}}$$

$$Nm^3/h = \frac{462462}{95,27}$$

$$Nm^3/h = 4854,2$$

$$m^3/h = Nm^3/h \cdot \left(\frac{1,013}{1,013 + P - (0,7 \cdot 0,0738)} \right) \cdot \left(\frac{273 + T}{273} \right)$$

$$m^3/h = 4854,2 \cdot \left(\frac{1,013}{9,43 - (0,7 \cdot 0,0738)} \right) \cdot \left(\frac{313}{273} \right)$$

$$m^3/h = 4854,2 \cdot 0,108 \cdot 1,14652$$

$$m^3/h = 601,15$$

OUTROS CÁLCULOS para GASES e VAPORES

Quando a **taxa de fluxo mínima** do ar ou gás (requerida pelo processo) é dada em kg/h ou libras/hora, e não há uma **condição de referência exigida** quanto à pressão e temperatura, a equação 14 abaixo também pode ser utilizada. Com a equação 15 pode ser encontrada a **máxima capacidade de vazão da válvula** e de acordo com a **área do bocal selecionada**:

$$A = \frac{W}{C \cdot P1 \cdot Kd} \cdot \sqrt{\frac{T \cdot Z}{M}} \quad \text{Equação 14}$$

$$W = C \cdot P1 \cdot Kd \cdot A \cdot \sqrt{\frac{M}{T \cdot Z}} \quad \text{Equação 15}$$

As equações mostradas acima para se determinar a capacidade de vazão da válvula em libras/hora, também podem ser utilizadas para quaisquer outros gases e vapores, bastando apenas substituir os valores de “C” e “M” de acordo com o gás. A tabela 6 mostra esses valores para diferentes tipos de gases de uso comum nas indústrias.

Observação: A **capacidade de vazão** de uma válvula de segurança **aumenta** com o **aumento** do **peso molecular do gás**, permitindo que a **área mínima requerida** seja **bem menor** que a **área final selecionada** quando comparamos **dois gases** com **pesos moleculares diferentes**, porém, com pressões de ajuste, temperaturas e volumes iguais. Assim, através de **dois bocais** com **áreas iguais** fluindo **dois gases** com essas características diferentes mencionadas, aquele que tiver **menor peso molecular** irá passar também em **menor** quantidade pelo bocal. Isto significa que a **área mínima** requerida **aumenta proporcionalmente** com a **raiz quadrada** do peso molecular do gás em questão.

O peso molecular do gás também pode influenciar no valor do **diferencial de alívio**. As válvulas de segurança que são dimensionadas para **ar comprimido**, porém, são utilizadas em **outros gases**, podem necessitar que o **posicionamento do anel inferior** (anel do bocal) seja alterado caso o fluido tenha um **peso molecular menor** do que daquele do ar, tais como a Amônia; o Metano; o Hélio. O mesmo raciocínio deve ser aplicado quando a válvula é **testada** pelo fabricante com **vapor d’água saturado** e posteriormente **aplicada** pelo usuário com **vapor d’água superaquecido**. Sua influência é ainda maior quanto maior for a **temperatura de superaquecimento** para a **temperatura de saturação** para a mesma **pressão de alívio**.

Observação: O diferencial de alívio de uma válvula de segurança é a **diferença** entre a **pressão de ajuste** e a **pressão de fechamento**, podendo ser expresso em porcentagem da pressão de ajuste ou em unidades de pressão. Ele também pode ter seu valor determinado pela área de passagem do bocal selecionada e o valor da sobrepressão aplicado no cálculo, resultante de um superdimensionamento ou subdimensionamento. Quanto **menor** for o valor da sobrepressão utilizada no cálculo da área do bocal, **maior** será a **área mínima** resultante, conseqüentemente, menor será o valor do diferencial de alívio. Se este valor for muito pequeno pode ocasionar um **fenômeno operacional** denominado *chattering* durante a operação da válvula. Este fenômeno ocorre quando uma sobrepressão **muito pequena** (menos de 3%) resulta numa área selecionada **superdimensionada** para o bocal.

Outro método que pode ser utilizado para se **estimar** a capacidade de vazão de uma determinada válvula de segurança operando com um gás diferente de ar comprimido é mostrado a seguir, através da equação 16. Esta equação pode ser necessária, pois as válvulas de segurança que operam com outros gases, diferentes do ar, não têm suas capacidades de vazão tabeladas pelos fabricantes:

$$\frac{W_{ar}}{W_{gás}} = \sqrt{\frac{M \cdot C}{M1 \cdot C1}} = X$$

Equação 16

$$W_{gás} = \frac{W_{ar}}{X}$$

Onde:

W ar = Vazão do ar comprimido, em libras/hora;

W gás = Vazão do gás, em libras/hora;

M = Peso molecular do **ar comprimido** de acordo com a tabela 6 em libras/hora, = 28,97 adimensional;

C = Valor da constante “C” do **ar comprimido**, conforme tabela 6;

M1 = Valor do peso molecular do **gás** de acordo com a tabela 6;

C1 = Valor da constante “C” do **gás** de acordo com a tabela 6

Exemplo:

Qual será a capacidade de vazão de uma válvula de segurança protegendo um Evaporador de **Amônia** (NH₃) a 10°C (50°F), cujo valor estampado na plaqueta, conforme seu fabricante, é de 6262,7 libras/hora de **ar comprimido** a 60°F, cuja pressão de ajuste é de 213 psig e o orifício do bocal é de 0,307 pol² (orifício F):

Onde:

C = Constante C do ar comprimido, conforme tabela 6;

M = Peso molecular do ar, conforme tabela 6 = 28,97 (adimensional);

C1 = Constante C do gás (Amônia), conforme tabela 6 ;

M1 = Peso molecular do gás Amônia, conforme tabela 6 = 17,03 (adimensional).

$$\frac{W_{ar}}{W_{gás}} = \sqrt{\frac{C \cdot M}{C1 \cdot M1}} = X$$

$$\frac{W_{ar}}{W_{gás}} = \sqrt{\frac{28,97 \cdot 356}{17,03 \cdot 347}} = 1,321$$

$$W_{gás} = \frac{6262,7}{1,321}$$

$$W_{gás} = 4740,9 \text{ lbs} / h$$

Portanto, a mesma válvula de segurança que permite a vazão de **6262,7 libras/hora** de **ar comprimido** a 60°F (15,56°C) e 213 psig de pressão de ajuste, permitirá também a vazão de **4740,9 libras/hora** de **Amônia** a 10°C (50°F) e na mesma pressão de ajuste.

A seguir são mostradas algumas conversões de SCFM para libras/hora:

$$W = \frac{M \cdot V}{6,32}$$

O peso molecular (M) de um gás pode ser determinado através da gravidade específica (G):

$$\text{Onde: } M = G \times 28,97$$

Sendo “G” a **gravidade específica** do fluido nas condições padronizadas de pressão e temperatura e 28,97 o peso molecular do ar comprimido. Sendo 1,0 o valor de “G” para ar comprimido a 60°F e 1 atm.

$$G = \text{Gravidade específica do gás na temperatura de escoamento} = \frac{G \cdot 520}{T + 460}$$

T = Esta é a temperatura do gás, em °F.

Para converter a unidade de vazão de gases de **massa** para **volumétrica**:

$$SCFM \cdot 60 = SCFH$$

$$SCFH = \frac{\text{lbs} / h}{G}$$

$$SCFH = \frac{\text{lbs} / h \cdot 379}{M}$$

$$SCFH = \frac{\text{lbs} / h \cdot 13,1}{G}$$

CÁLCULO para VAPORES ENVOLVENDO DUAS (ou mais) VÁLVULAS de SEGURANÇA

Quando duas ou mais válvulas de segurança são utilizadas para proteger um vaso de pressão, o balão de vapor de uma caldeira, etc, a **soma** das máximas capacidades de vazão das válvulas pode ser determinada conforme é mostrado abaixo:

Exemplo:

Qual é a máxima capacidade de vazão a ser aliviada por duas válvulas de segurança instaladas para proteger um vaso de pressão operando com vapor d'água saturado, construído conforme o código ASME Seção VIII – Divisão 1?

Dados:

Pressão de ajuste das válvulas: (200 e 210 psig);

P1: Pressão de alívio das válvulas (pressão de ajuste + sobrepressão + pressão atmosférica);

Válvula 1: $(200 \times 1,1 + 14,7) = 234,7$ psia;

Válvula 2: $(210 \times 1,1 + 14,7) = 245,7$ psia;

Kd: Coeficiente de descarga = 0,975 (conforme sugerido pelo API Std. 520 Parte 1);

Fluido: vapor d'água saturado;

A: Área mínima requerida, em po^2 ;

W: Capacidade de vazão **total requerida** pelo vaso, em **lbs/h** = 60 ton/h (60000 kg/h);

Portanto, cada válvula deverá ser responsável por aproximadamente 30 ton/h (30000 kg/h = **66136,8 lbs/h**).

VÁLVULA 1

$$A = \frac{W}{51,5 \cdot P1 \cdot Kd \cdot Ksh}$$

$$A = \frac{66136,8}{51,5 \cdot 234,7 \cdot 0,975 \cdot 1,0}$$

$$A = \frac{66136,8}{11784,9}$$

$$A = 5,612$$

VÁLVULA 2

$$A = \frac{W}{51,5 \cdot P1 \cdot Kd \cdot Ksh}$$

$$A = \frac{66136,8}{51,5 \cdot 245,7 \cdot 0,975 \cdot 1,0}$$

$$A = \frac{66136,8}{12337,2}$$

$$A = 5,36$$

Observação: A **área mínima requerida** para a **válvula 1** (ajustada para abrir com 200 psig) é **maior** do que a **área da válvula 2** (ajustada para abrir com 210 psig) devido à **menor pressão de ajuste** e, consequentemente, **maior volume de vapor** que é liberado.

Observação: O **fator de correção Ksh** é utilizado somente nos cálculos de dimensionamento de válvulas de segurança operando com **vapor d'água superaquecido**. O valor deste fator de correção é sempre **menor** que 1,0, pois as **temperaturas** são **maiores** que as de **saturação**, sendo tabelados tanto pelo Código ASME (Seções I e VIII) quanto pelos fabricantes de válvulas de segurança. Ele pode ter **diversos valores** para a **mesma pressão** conforme a temperatura de superaquecimento varia na tabela. Seu valor é cada vez menor conforme a temperatura é **elevada**. Ele tem a função de adequar a área de passagem do bocal devido ao **maior volume** de vapor superaquecido, causado pela **maior temperatura**, em comparação com a do vapor saturado para a **mesma pressão**, ou seja, ele **corrige** a capacidade de vazão da válvula de segurança operando com vapor d'água superaquecido devido à temperatura estar **acima** da temperatura de saturação. Os fabricantes publicam capacidades de vazão somente para **vapor d'água saturado, ar comprimido e água**.

Nesses cálculos, sendo que o fluido é vapor d'água saturado, então o valor do fator de correção Ksh = 1,0 e independentemente do valor da pressão. Isto porque **o valor de superaquecimento do vapor d'água saturado é zero**.

Para a proteção do vaso de pressão deste exemplo, deverão ser selecionadas duas válvulas de segurança com orifício "P" cada uma, cuja área efetiva é de 6,38 pol², conforme API Std. 526. A soma da máxima capacidade de vazão por ambas as válvulas será de:

$$W = \left(\frac{AS}{AV1} + \frac{AS}{AV2} \right) \cdot CVR \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

W = Máxima capacidade de vazão pelas duas válvulas de segurança, em lbs/h;

AS = Área selecionada, conforme tabela 5, em pol²;

AV1 = Área mínima encontrada no cálculo para a válvula 1, em pol²;

AV2 = Área mínima encontrada no cálculo para a válvula 2, em pol²;

CVR = Mínima capacidade de vazão requerida pelo processo, em lbs/h.

$$W = \left(\frac{6,38}{5,612} + \frac{6,38}{5,36} \right) \cdot 66136,8 = 153910,13$$

Este valor de 153910,13 libras/hora é equivalente a 69814,4 kg/h e que excede o mínimo requerido pelo vaso que é de 60 ton/h.

VÁLVULA 1 = Máxima capacidade de vazão é de 75187,5 libras/hora

VÁLVULA 2 = Máxima capacidade de vazão é de 78711,4 libras/hora

$$W = 51,5 \cdot P1 \cdot Kd \cdot A \cdot Ksh$$

$$W = 51,5 \cdot 249 \cdot 0,975 \cdot 6,38 \cdot 1,0$$

$$W = 75187,5lbs / h$$

Observação: Substituindo na equação acima o valor de 6,38 por 1, é possível saber a capacidade de vazão de cada orifício, conforme mostrado na tabela 5, multiplicando o resultado obtido pelo valor do orifício correspondente, e para uma determinada pressão.

O valor de “W” representa a máxima capacidade de vazão da válvula de segurança alcançada nas condições de alívio.

Através da “**regra de três**” também é possível determinar qual será a máxima capacidade de vazão do orifício selecionado.

Comprovando o resultado obtido acima:

$$W = \frac{CVR \cdot AS}{AV1}$$

$$W = \frac{66136,8 \cdot 6,38}{5,612} = 75187,5lbs / h$$

Equação 18

CAPACIDADE de VAZÃO REQUERIDA para VAPOR SATURADO em M³/h:

Com o **aumento** da **pressão** do vapor sua **densidade** também **aumenta**, enquanto seu **volume específico diminui**. Isto ocorre porque o volume específico do vapor está **inversamente relacionado** com sua **densidade (massa específica)**. Deste modo, o **volume específico do vapor diminui** com o **aumento da pressão**.

Às vezes são encontrados valores de taxa de fluxo requerida pelo processo em **m³/h** (metros cúbicos por hora) de vapor d’água saturado, porém, normalmente nas normas e padrões de dimensionamento, incluindo os catálogos dos fabricantes, são encontradas equações e tabelas que resultam em valores de capacidades de vazão em libras/hora ou kg/h (unidades de vazão em massa). Quando nos deparamos com essas situações, devemos primeiramente converter a taxa de fluxo em m³/h para kg/h. O valor em kg/h pode também ser convertido para lbs/h de acordo com a equação a ser utilizada, se em unidades métricas ou inglesas, respectivamente.

Para essa conversão devemos encontrar a **massa específica** do vapor de acordo com a **pressão de alívio (pressão de ajuste + sobrepressão + pressão atmosférica)** requerida pelo processo para a válvula de segurança que será selecionada. Como já mencionado anteriormente, a massa específica é o mesmo que **densidade relativa**, sendo que esta é **inversa** ao **volume específico do vapor**. Para cada pressão de vapor d’água saturado há uma pressão e temperatura em valores definidos. Da mesma forma, para cada pressão desse vapor há também um **volume específico definido**. Precisamos então converter a taxa de fluxo, de m³/h para kg/h de acordo com a **pressão de alívio** requerida.

Observação: Tanto os valores de pressão (absoluta e relativa), temperatura, volume específico, calor sensível, calor latente e calor total são encontrados em tabelas próprias de vapor d’água saturado.

Por exemplo: Qual é a capacidade de vazão requerida, em libras por hora, para a válvula de segurança (VÁLVULA 2 do exemplo acima) **ajustada para abrir** com 210 psig (14,48 barg), pressão de alívio de 245,7 psia (16,94 bara) e cuja vazão requerida pelo processo é de **3830 m³/h**?

Para essa pressão de alívio de 245,7 psia, e consultando uma tabela de vapor d'água saturado, encontramos um **volume específico de 0,127664 m³/kg**. Para converter a taxa de fluxo em **m³/h** para **kg/h** precisamos antes encontrar o valor de sua massa específica (**em kg/m³**) e que é dado pela equação 19 abaixo:

$$m = \frac{1}{v}$$

$$m = \frac{1}{0,127664}$$

Equação 19

$$m = 7,833$$

O mesmo resultado (**em kg/h**) é possível de ser encontrado dividindo-se o valor de **taxa de fluxo requerida** pelo processo (**em m³/h**), pelo **volume específico do vapor, em m³/kg**, para a pressão de alívio requerida, conforme mostra equação a seguir:

$$kg/h = \frac{m^3/h}{m^3/kg}$$

$$kg/h = \frac{3830}{0,127664}$$

$$kg/h = 30000$$

Onde:

m: massa específica do vapor, em kg/m³;

v: volume específico do vapor, em m³/kg;

m³/h: taxa de fluxo requerida pelo processo;

Utilizando este resultado é possível agora fazermos a conversão. Assim:

$$3830 \text{ m}^3/\text{h} \times 7,833 \text{ m}^3/\text{kg} = 30000 \text{ kg/h}$$

$$\text{Lbs/h} = \text{kg/h} \times 2,20459 \quad \text{Lbs/h} = 30000 \times 2,20459 \quad \text{Lbs/h} = 66137,7$$

Portanto, este é o valor de taxa de fluxo requerida pelo processo, em lbs/h, para se calcular a área mínima requerida utilizando-se a equação 20 abaixo:

$$A = \frac{W}{51,5 \cdot P1 \cdot Kd \cdot Ksh} \quad \text{Equação 20}$$

Sendo que a máxima capacidade de vazão desta válvula de segurança é de 78711,4 lbs/h (35703,4 kg/h), o valor convertido para m³/h será de: 4558,6. Podendo ser obtido também através da “regra de três”.

O resultado será uma válvula de segurança tamanho 4” x 6”, orifício “P” (área efetiva de 6,38 pol²) cuja área mínima requerida será de 5,36 pol², conforme já havia sido comprovado na página 29.

Observação: O mesmo procedimento mostrado acima para **vapor d’água saturado** também pode ser feito para **vapor d’água superaquecido**, bastando apenas o leitor ter em mãos uma tabela de vapor superaquecido e com seus respectivos volumes específicos em m³/h, de acordo com a pressão e a temperatura da aplicação.

CONCLUSÃO

A razão principal para a instalação de uma válvula de segurança é a **proteção de vidas** e do **capital investido** no equipamento por ela protegido. Porém, para garantir esta proteção a válvula deve estar corretamente especificada, dimensionada, instalada, inspecionada e mantida. Para o dimensionamento correto o usuário deve saber diferenciar a **taxa de fluxo real requerida pelo seu processo** em relação à **capacidade de vazão nominal da válvula de segurança**, na **área final selecionada**, conforme publicada por seu fabricante, principalmente se o fluido for ar comprimido ou outro gás qualquer. Com a **taxa de fluxo real requerida pelo processo** e convertida ao valor correto, ele pode aplicá-lo na equação correta. Para isto ele deverá converter corretamente a condição real em “padronizada” ou “normalizada”. Se esta conversão não for feita, uma válvula **subdimensionada** poderá ser especificada, comprada e instalada, conseqüentemente, a válvula não será capaz de reduzir a pressão a um nível seguro e, assim, não permitir uma proteção adequada à sua planta. Portanto, quando dimensionando a área de passagem do bocal de uma válvula de segurança, ou mesmo outros tipos de válvulas que irão operar com ar comprimido, além de outros gases (tóxicos ou não), o usuário deve, primeiramente, converter as suas **condições reais** para as condições “normalizadas” ou “padronizadas” e comparar os valores convertidos com aqueles **publicados** pelos fabricantes e escolher o **valor acima** mais próximo, e com esse valor selecionar a válvula de segurança com o orifício correto. Na dúvida o usuário deve recorrer aos fabricantes de válvulas de segurança e solicitar auxílio.

REFERÊNCIAS –

MATHIAS, A. C. – “Válvulas Industriais, Segurança e Controle – Tipos, Seleção e Dimensionamento” – 2ª Edição – 2014 – ARTLIBER Editora – 552 pág.

API Std. 520 Parte 1 – Seleção e Dimensionamento de Válvulas de Segurança em Vasos de Pressão – Edição 2000

ASME Seção VIII – Divisão 1 – Vasos de Pressão Não-Submetidos a Fogo – Edição 2010

Outras literaturas recomendadas sobre válvulas e do mesmo autor deste artigo:

<http://www.fluidcontrols.com.br/site/upload/pdf/Manutencao-preventiva-em-valvulas-de-seguranca.pdf>

http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/V%EA1lvula_de_Seguran%E7a_1.pdf

http://www.ebah.com.br/content/ABAAAg_LYAI/queda-pessao-na-entrada-saida-valvulas-seguranca

http://www.fluidcontrols.com.br/site/upload/pdf/Apostila_Valvulas_de_Seguranca_e_Alivio.pdf

<http://www.fluidcontrols.com.br/site/upload/pdf/Controle-de-Fluxo-Atraves-de-Valvulas-Manuais-e-Automaticas.pdf>

<http://www.infoescola.com/engenharia/aplicacao-correta-das-valvulas-nas-industrias/>

Sobre o autor: Artur Cardozo Mathias é técnico mecânico industrial e técnico químico e atua desde 1985 na área de manutenção, especificação, dimensionamento e consultoria em válvulas, tendo ministrado cursos e palestras sobre o tema em Empresas (incluindo fabricantes de válvulas), Universidades e Escolas Técnicas. É também autor do livro *Válvulas: Industriais, Segurança e Controle*, Artliber Editora. Sendo este o livro mais completo sobre o assunto já publicado na América Latina.

Dúvidas e comentários podem ser enviados ao e-mail do autor:

dinizmathias@uol.com.br