



Equilíbrio Dinâmico e Controlo de Sistemas Hidráulicos



- O conforto térmico permite que as pessoas se entreguem aos seus afazeres sem serem importunadas por sensações de frio ou calor.
- Aumenta os níveis de concentração
- Melhora os índices de produtividade
- É um direito que assiste às pessoas

$$M = P_{Conv} + P_{Rad} + P_{Evap} + \cancel{P_{Resp}} + \cancel{W} + \cancel{S}$$

Nível de actividade $T_a, V_a, \text{Vestuário}$ $T_{rad}, \text{Vestuário}$ ϕ, V_a ≈ 0 ≈ 0 ≈ 0

● O conforto térmico depende principalmente de:

- Temperatura do ar
- Velocidade do ar
- Humidade relativa
- Temperatura radiante média
- Nível de actividade
- Tipo de vestuário

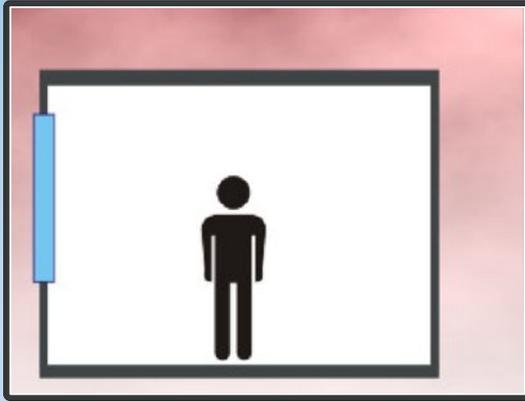
$$M = P_{Conv} + P_{Rad} + P_{Evap} + \cancel{P_{Resp}^{\approx 0}} + \cancel{W^{\approx 0}} + \cancel{S^{\approx 0}}$$

Nível de actividade T_a, V_a T_{rad} ϕ, V_a
Vestuário Vestuário

- O conforto térmico depende principalmente de:

Campo de actuação da climatização

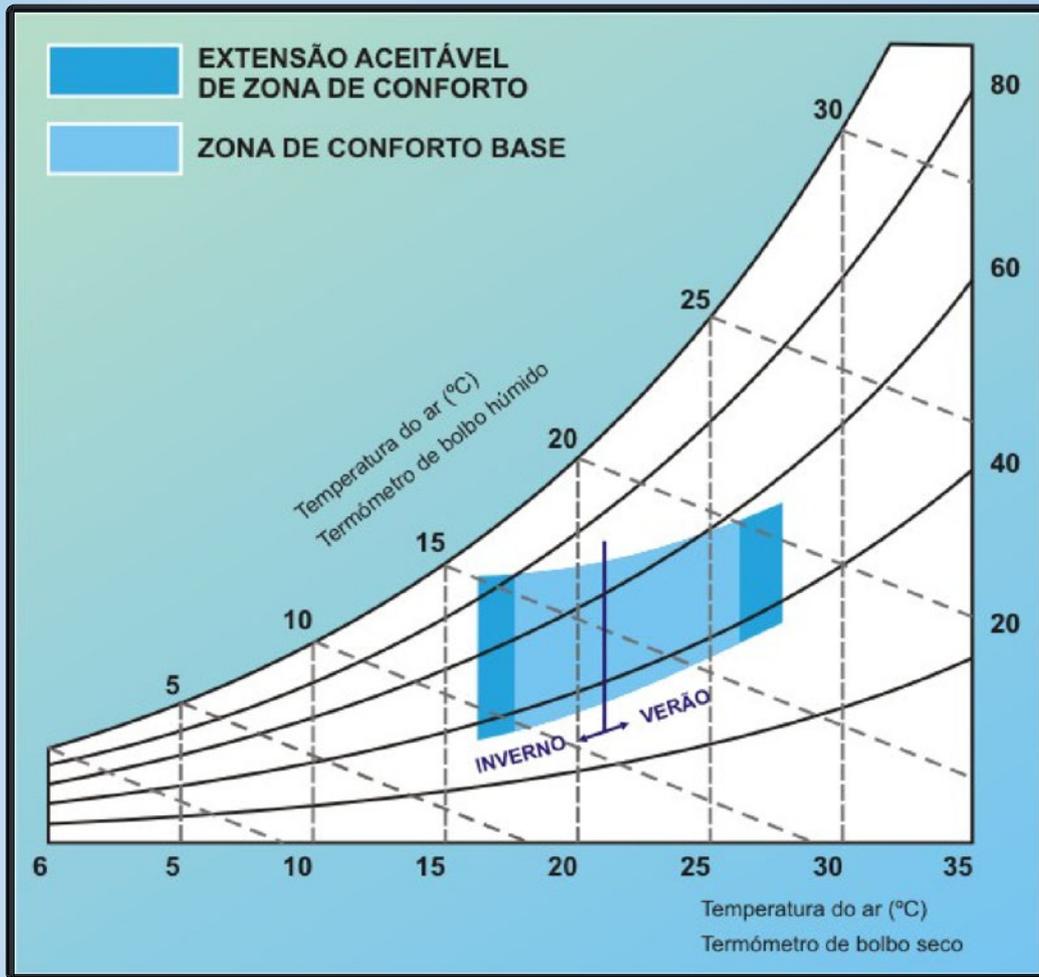
- Temperatura do ar
- Velocidade do ar
- Humidade relativa
- Temperatura radiante média
- Nível de actividade
- Tipo de vestuário



- A temperatura radiante é uma temperatura média das **superfícies** que cercam um espaço.
- Não tem a ver com a temperatura do ar.

$$(T_{Rad} + 273)^4 = \sum_{i=1}^N F_{h-i} (T_i + 273)^4 \quad \sum_{i=1}^N F_{h-i} = 1$$

Se a temperatura radiante diminuir é possível aumentar a temperatura do ar mantendo igual nível de conforto. É o princípio de funcionamento dos tectos arrefecidos.



- Consiste em assegurar condições ambientais que garantam níveis adequados de conforto térmico para os seus ocupantes.

- Tal implica equilibrar as cargas térmicas existentes no espaço a climatizar através de:
 - Sistemas tudo ar (ex: VAV)
 - Sistemas tudo água (ex: tectos arref., fan-coils 2/4 tubos)
 - Sistemas ar-água (ex: DID, difusores indutivos)

- Implica também suprir os ocupantes com uma quantidade e qualidade adequadas de ar novo (será chamado "ar neutro" se não tiver efeito sobre as cargas térmicas).

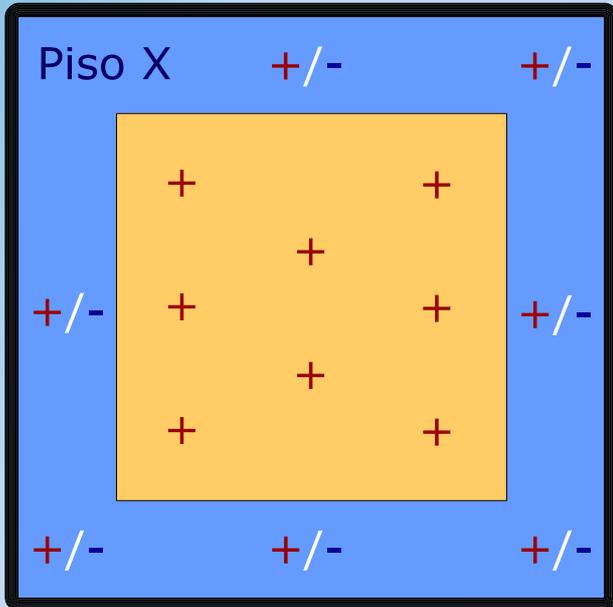
● Cargas sensíveis:

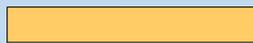
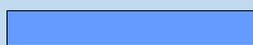
- Ganhos/perdas pela envolvente
(transmissão térmica e infiltração de ar)
- Ganhos solares através dos envidraçados
- Ocupação humana
- Iluminação
- Equipamento eléctrico e electrónico
(computadores, impressoras, etc...)

● Cargas latentes:

- Permeação de ar húmido pela envolvente
- Ocupação humana (transpiração)

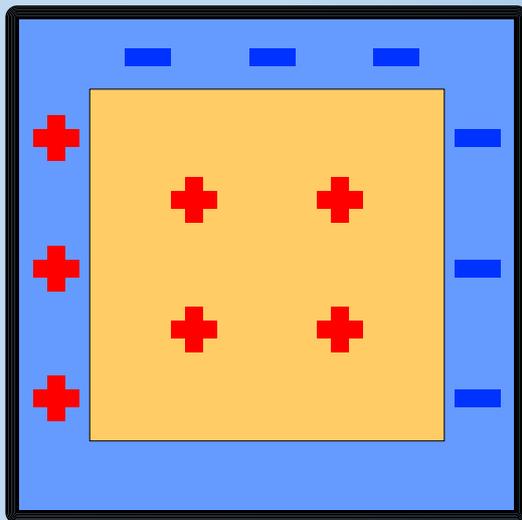
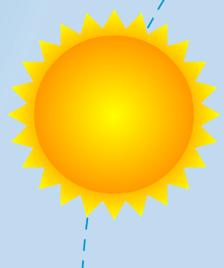
● Cargas sensíveis

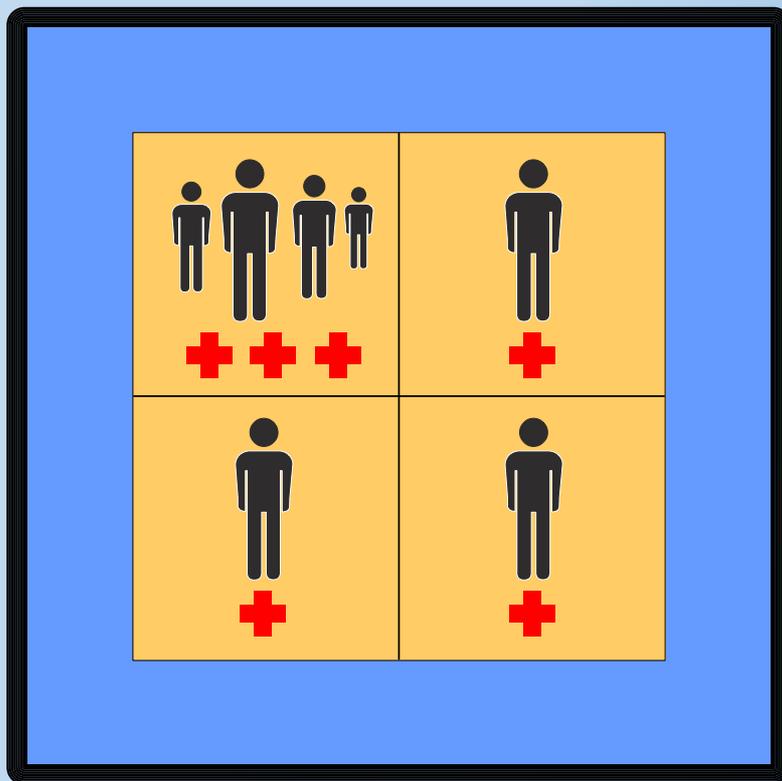


 Zona Interna
 Zona Periférica

| | Zona Periférica | Zona Interna |
|------------------|-----------------|--------------|
| Envolvente | +/- | |
| G. Solares | + | |
| Ocup. Hum. | + | + |
| Iluminação | + | + |
| Eq. Eléctrico | + | + |
| Resultado | +/- | + |

● Cargas latentes: sempre +





- Um edifício é um sistema dinâmico.
- As necessidades de aquecimento e de arrefecimento variam no espaço e ao longo do tempo – cargas térmicas variáveis.
- Estas cargas podem ser equilibradas através de ar (sistemas tudo ar), ou de água (sistemas tudo água) ou de uma combinação de ambos (sistemas ar água)

\dot{m} Caudal mássico (kg/s)

C_P Calor específico (J/kg K)

ΔT Diferencial temperatura (K)
temp. final - temp. inicial

ρ Densidade (kg/l)

Q Caudal volúmico (l/s)

ΔP Pressão diferencial (Pa)

η Rendimento do motor

- A potência térmica transmitida através de um caudal de ar ou água é dada por:

$$\dot{E} = \dot{m} C_P \Delta T \Leftrightarrow \dot{E} = Q \rho C_P \Delta T$$

- A potência eléctrica dispendida a movimentar um caudal de ar ou água é dada por:

$$\dot{W} = \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho \eta} \Leftrightarrow \dot{W} = \frac{Q \Delta P}{\eta}$$

d

Diâmetro da tubagem (m)

L

Comprimento da tubagem (m)

f

Factor de atrito

k_i

Factor de perdas localizadas

k

Resistência equivalente

- Os sistemas de distribuição de ar ou água em circuito fechado apresentam curvas características muito aproximadamente quadráticas, da forma:

$$\Delta P = \rho Q^2 \frac{8}{\pi^2 d^4} \left[\frac{fL}{d} + \sum_i k_i \right]$$

- Ou:

$$\Delta P = \rho k Q^2 \quad \text{com} \quad k = \frac{8}{\pi^2 d^4} \left[\frac{fL}{d} + \sum_i k_i \right]$$

- Assim, a potência eléctrica dispendida para circular um determinado caudal de fluido é:

$$\dot{W} = \frac{\rho k}{\eta} Q^3$$

- Ou, utilizando a relação entre o caudal circulado e a potência eléctrica necessária:

$$Q = \frac{\dot{E}}{\rho C_P \Delta T}$$

$$\dot{W} = \dot{E}^3 \frac{k}{\eta \rho^2 C_P^3 \Delta T^3}$$

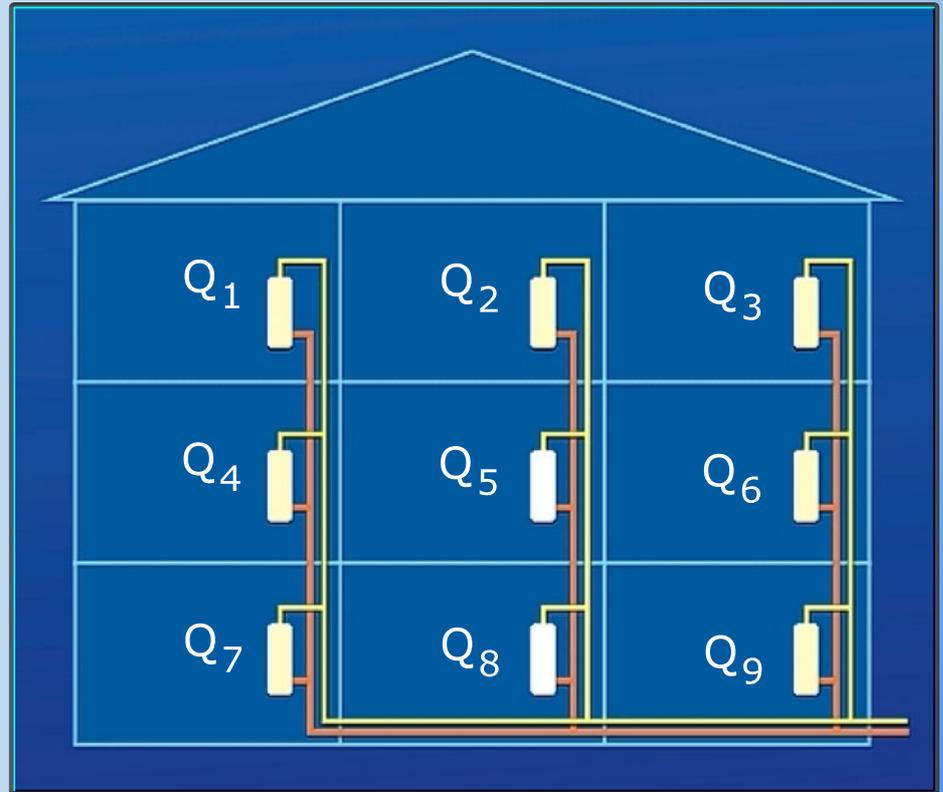
Comparação trabalho de transporte Ar-Água, $\hat{E}=C^{te}$

| | | Ar | Água | |
|-----------------------------|-------------------------------|-------|------------------------------|-----------|
| \hat{E} (kW) | | 1 | 1 | |
| ρ (kg/m ³) | | 1.18 | 998 | |
| C_p (kJ/kg/K) | | 1.005 | 4.18 | |
| ΔT (K) | | 8 | 2 | |
| Q (m ³ /h) | $\hat{E}/\rho/C_p/\Delta T$ | 379 | 0.43 | |
| ΔP (Pa) | | 800 | 50,000 (\approx 5 m.c.a.) | |
| η | | 0.7 | 0.8 | |
| \hat{W} (W) | $(Q/3600)\times\Delta P/\eta$ | 120.5 | 7.5 | 6% |

- Sendo possível optar por climatizar o edifício através de caudais de ar ou de água, é preferível optar por um caudal de água, visto que:
 - Consome menor energia para circulação
 - É mais compacto (ocupa menos espaço)
 - Requer menos manutenção
- A potência térmica presente numa dada zona é directamente proporcional ao caudal de água circulante nessa zona.

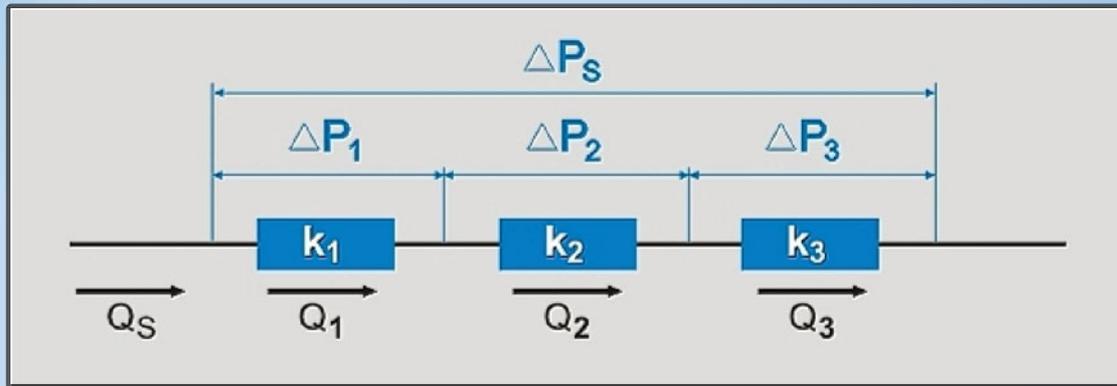
PERGUNTA:

Como garantir o caudal desejado em cada zona/equipamento?

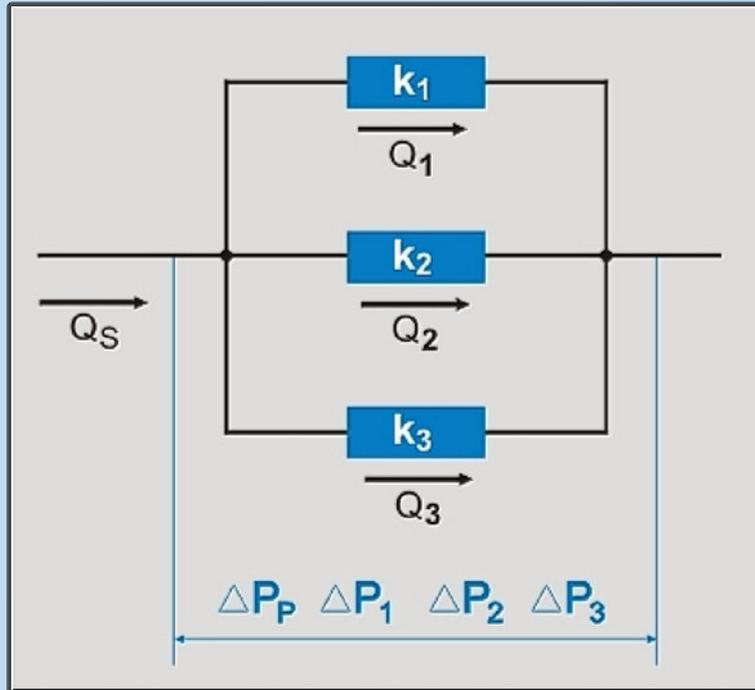


$$\Delta P = \rho k Q^2 \Rightarrow \sqrt{\Delta P} = \sqrt{\rho k} Q$$

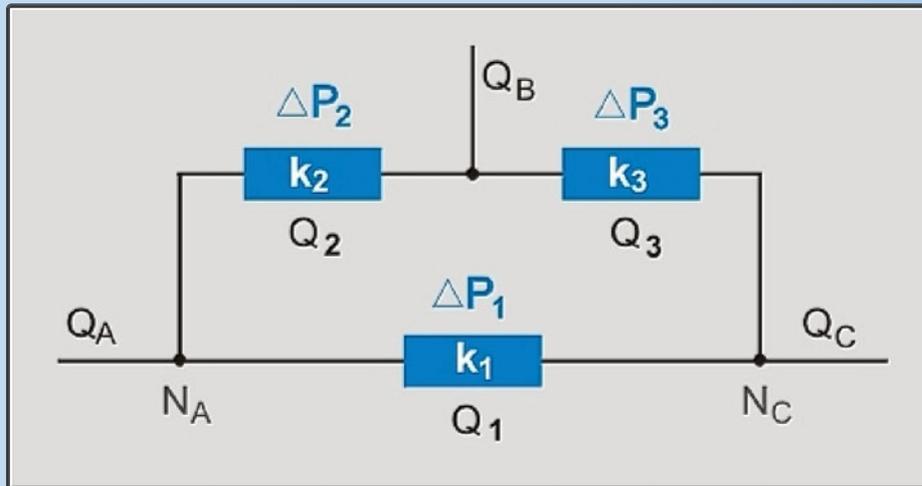
| Circuito hidráulico | Circuito eléctrico |
|-------------------------|--------------------|
| ΔP | U |
| Q | I |
| ρk | R |
| $\Delta P = \rho k Q^2$ | U=R I |



$$\left. \begin{aligned} \Delta P_S &= \sum \Delta P_i \\ Q_S &= Q_1 = \dots = Q_n \end{aligned} \right\} k_S = \sum k_i$$



$$\left. \begin{aligned} \Delta P_P &= \Delta P_1 = \dots = \Delta P_n \\ Q_P &= \sum Q_i \end{aligned} \right\} \frac{1}{\sqrt{k_P}} = \sum \frac{1}{\sqrt{k_i}}$$



Em cada malha:

$$\sum \Delta P_i = 0$$

Em cada nó:

$$\sum Q_i = 0$$

Elemento genérico do circuito

$$\sqrt{\Delta P} = \sqrt{\rho k} Q$$

Associação em série de vários elementos resistivos

$$k_{eq} = \sum k_i$$

Associação em paralelo de vários elementos resistivos

$$\frac{1}{\sqrt{k_{eq}}} = \sum \frac{1}{\sqrt{k_i}}$$

k_{eq} = Resistência equivalente à passagem do fluido

Caso particular das válvulas

$$Q = K_V \sqrt{\Delta P} \Rightarrow K_V = \frac{1}{\sqrt{\rho k}}$$

Q = Caudal (m³/h)

ΔP = Perda de carga (bar)

K_V = **Coefficiente de passagem da válvula**

Associação em série

$$\frac{1}{K_{V,eq}^2} = \sum \frac{1}{K_{V,i}^2}$$

$K_{V,eq}$ = Coeficiente de passagem equivalente

Associação em paralelo

$$K_{V,eq} = \sum K_{V,i}$$

Válvula toda aberta

$$K_V = K_{VS} \quad (\rightarrow \Delta P_V = \Delta P_{MIN})$$

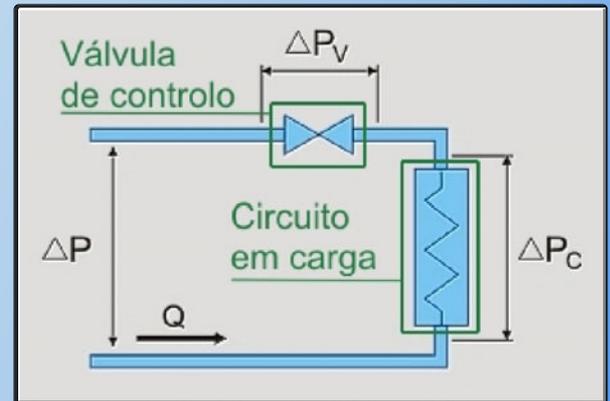
Válvula toda fechada

$$K_V = K_{VS} \quad (\rightarrow \Delta P_V = \Delta P_{MAX} = \Delta P)$$

Autoridade

$$A_V = \frac{\Delta P \text{ válvula toda aberta}}{\Delta P \text{ válvula toda fechada}} = \frac{\Delta P_{min}}{\Delta P}$$

$$A_V = \frac{Q^2 K_{VS}^2}{\Delta P} = \frac{K_{V,eq}^2 \Delta P}{K_{VS}^2 \Delta P} = \frac{K_{V,eq}^2}{K_{VS}^2} = \frac{K_{VC}^2}{K_{VC}^2 + K_{VS}^2}$$



K_{VS}

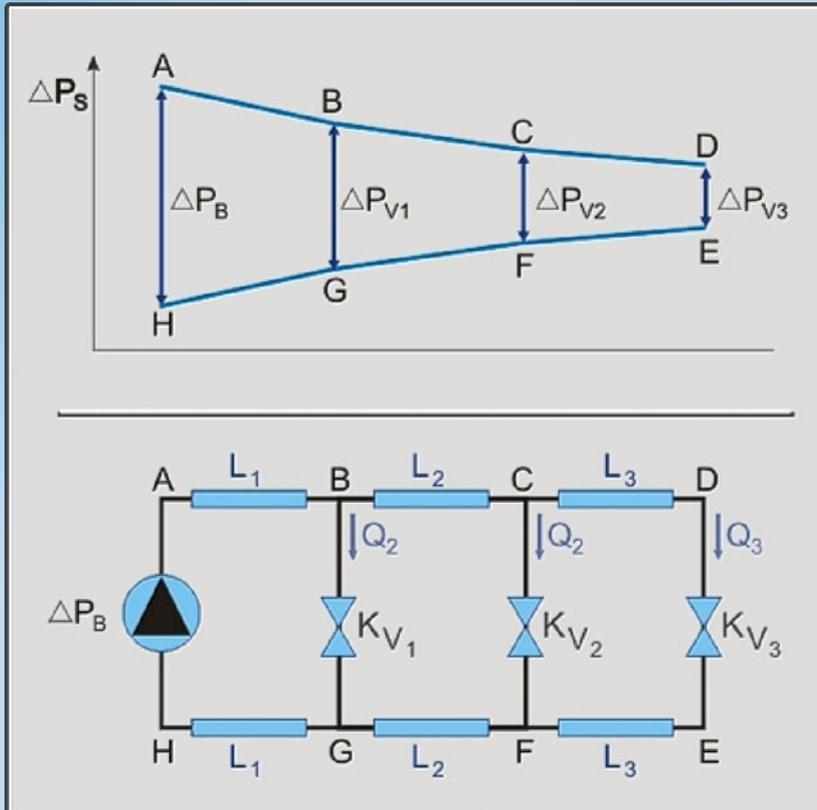
Coeficiente de passagem da válvula quando toda aberta

K_{VC}

Coeficiente de passagem do circuito em carga

$K_{V,eq}$

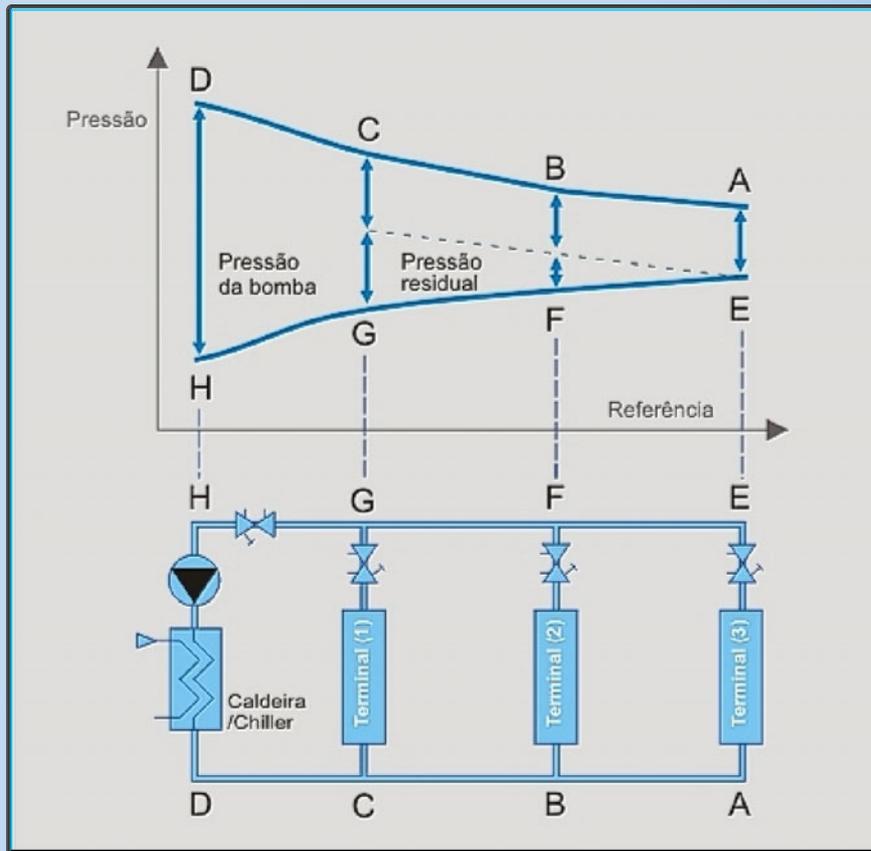
Coeficiente de passagem equivalente

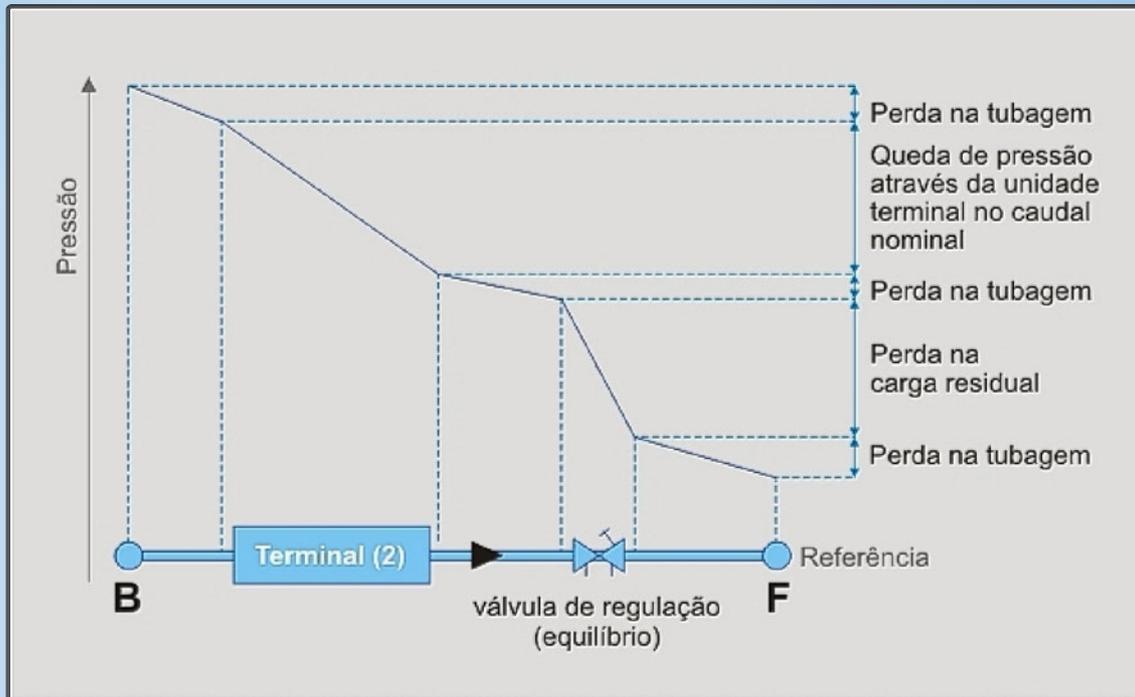


- Neste caso todos os caudais (Q_1, Q_2 e Q_3) dependem simultaneamente dos coeficientes K_{V1} , K_{V2} e K_{V3}

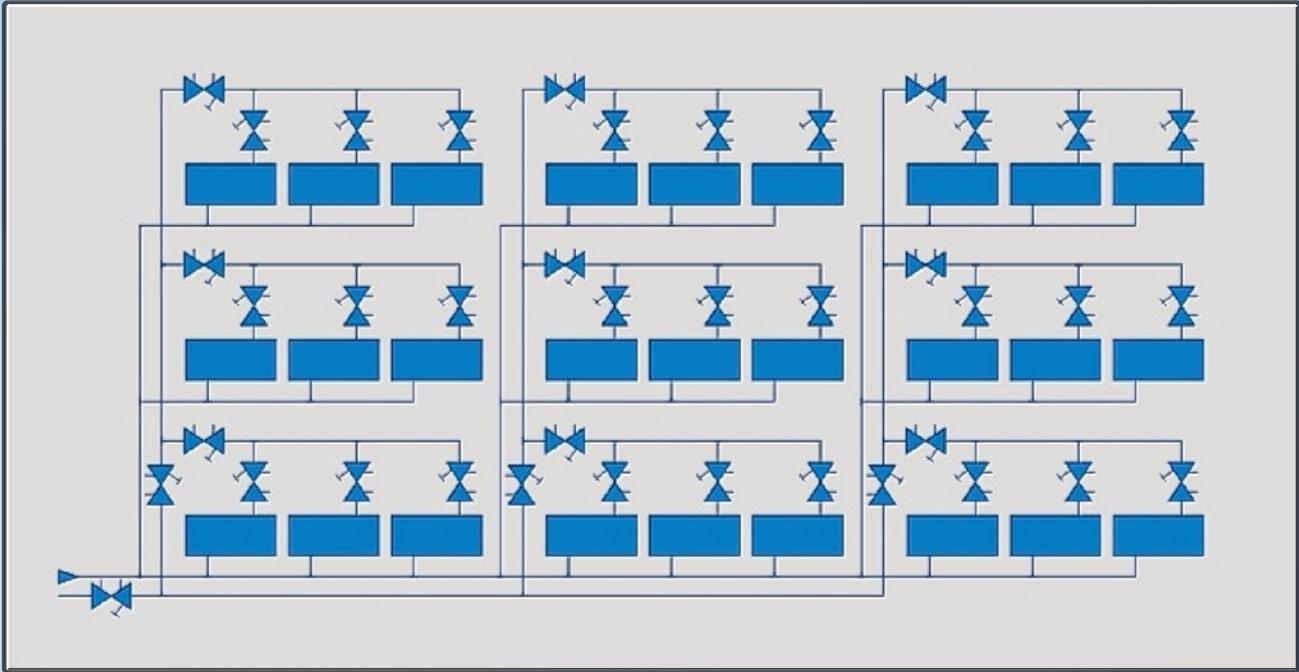
● CONSEQUÊNCIA

Alterando apenas um dos valores de K_{V1} , K_{V2} ou K_{V3} alteram-se todos os valores dos caudais Q_1, Q_2 e Q_3





- Comissionamento: ajuste interactivo de todas as válvulas



$K_{MIN} = cte$

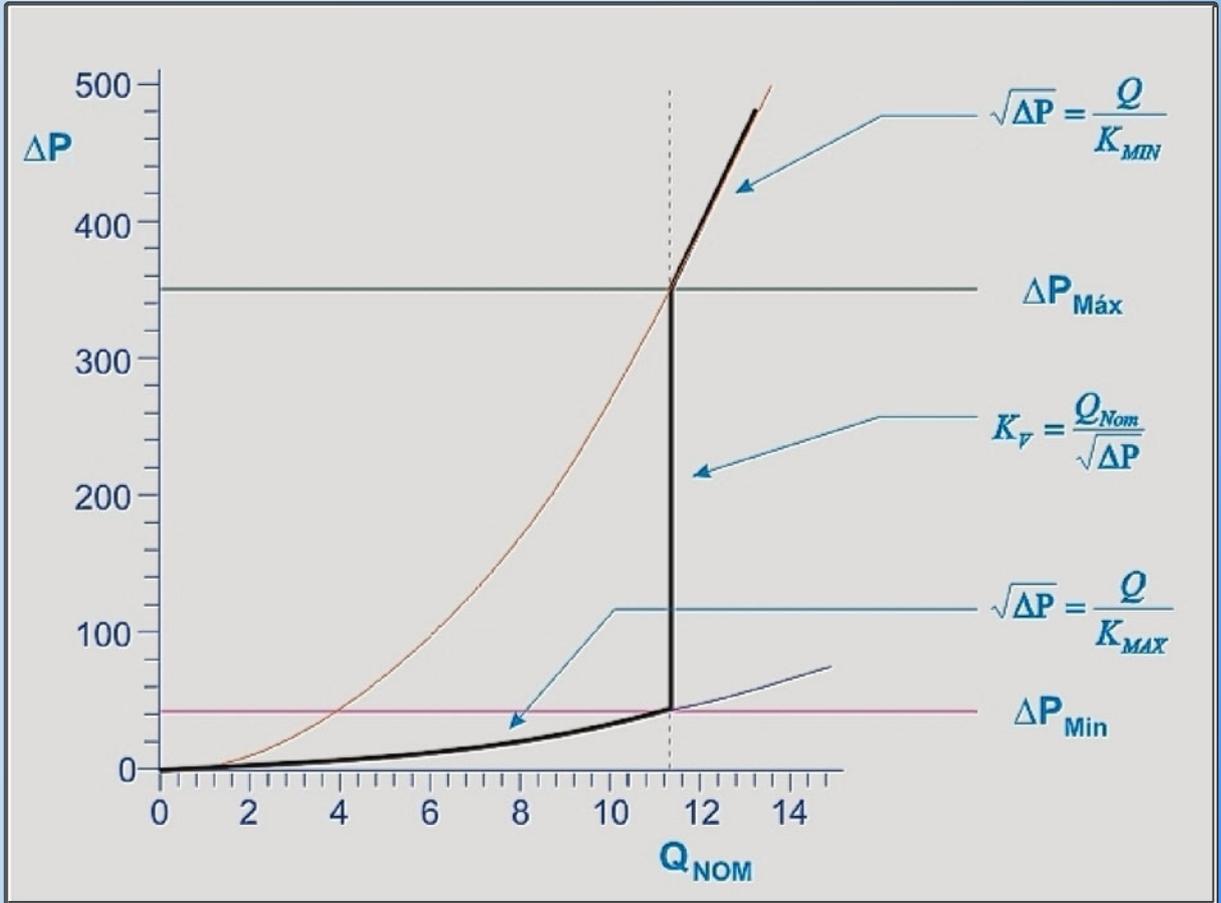
$Q, \Delta P = \text{variável}$

$Q_{Nom} = cte$

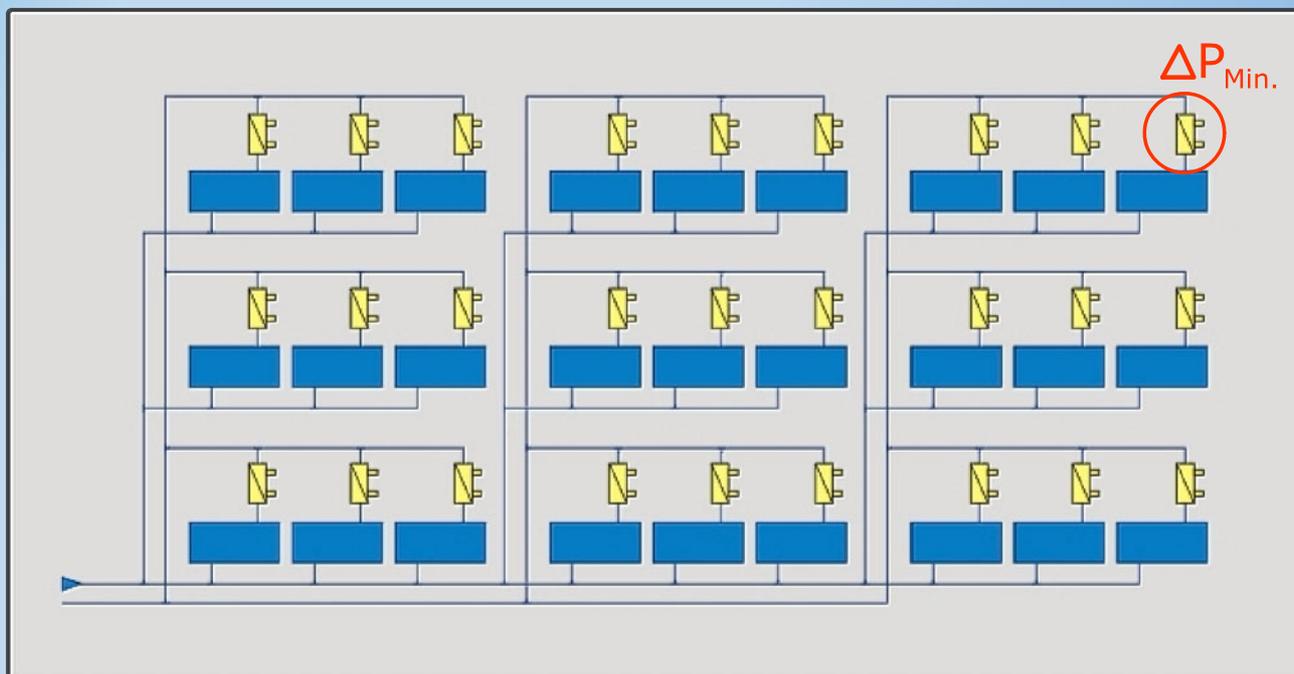
$K_V, \Delta P = \text{variável}$

$K_{MAX} = cte$

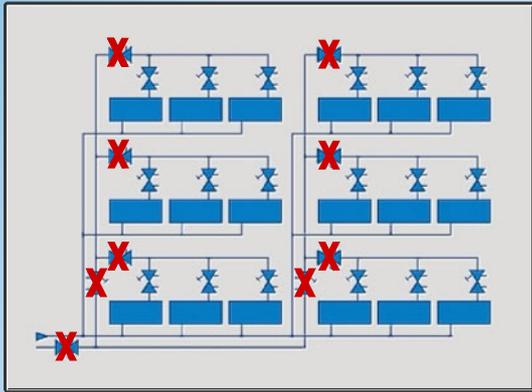
$Q, \Delta P = \text{variável}$



- Comissionamento: colocar os cartuchos nos casquilhos

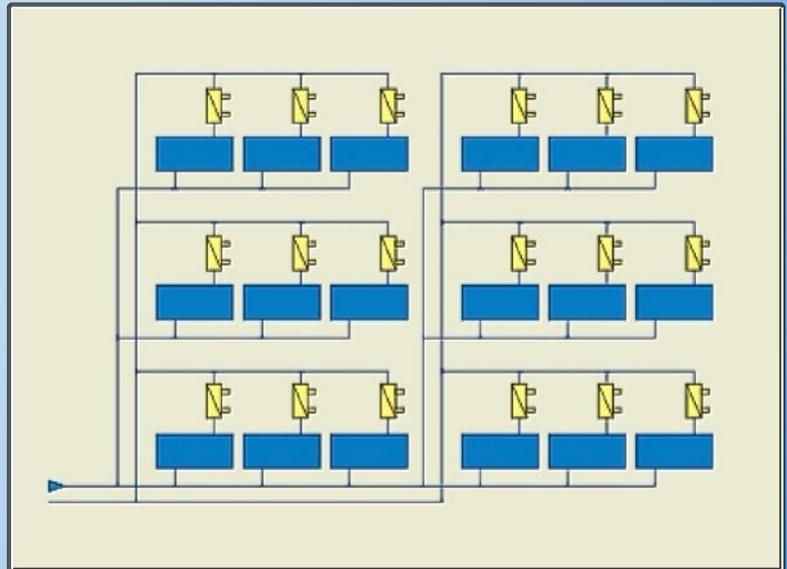


Equilíbrio estático

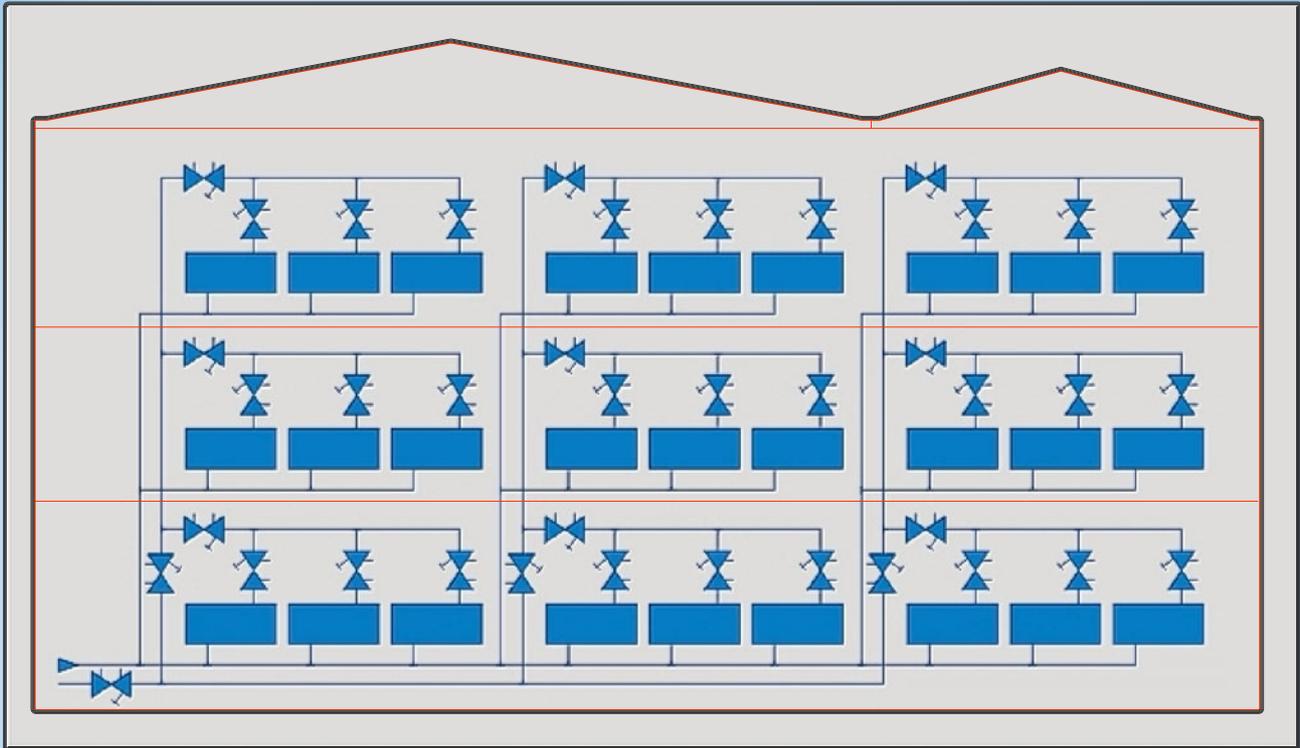


Equilíbrio dinâmico

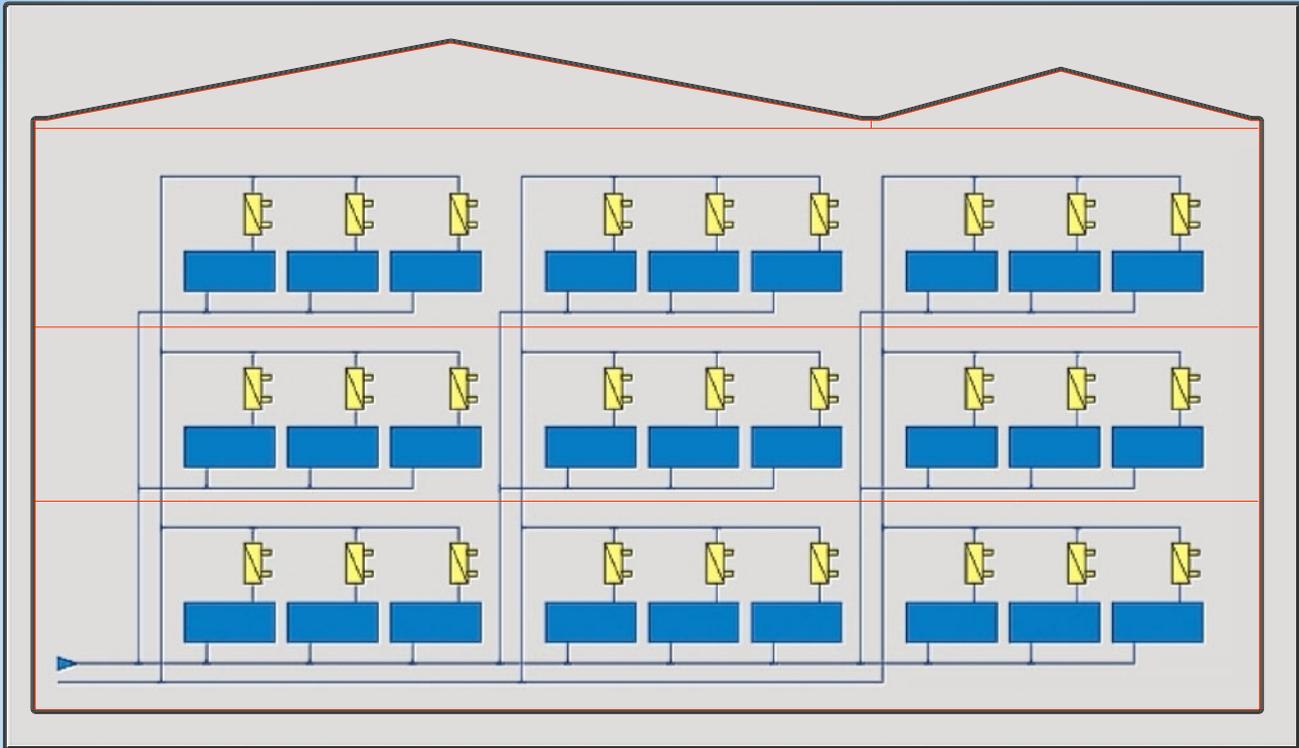
Menos 9 válvulas
33% de poupança



Comissionamento: ajuste interactivo de **40** válvulas



Comissionamento: colocar **9** cartuchos nos casquilhos



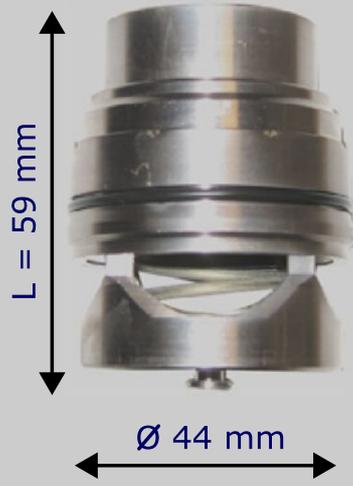


Video





DN 15-25



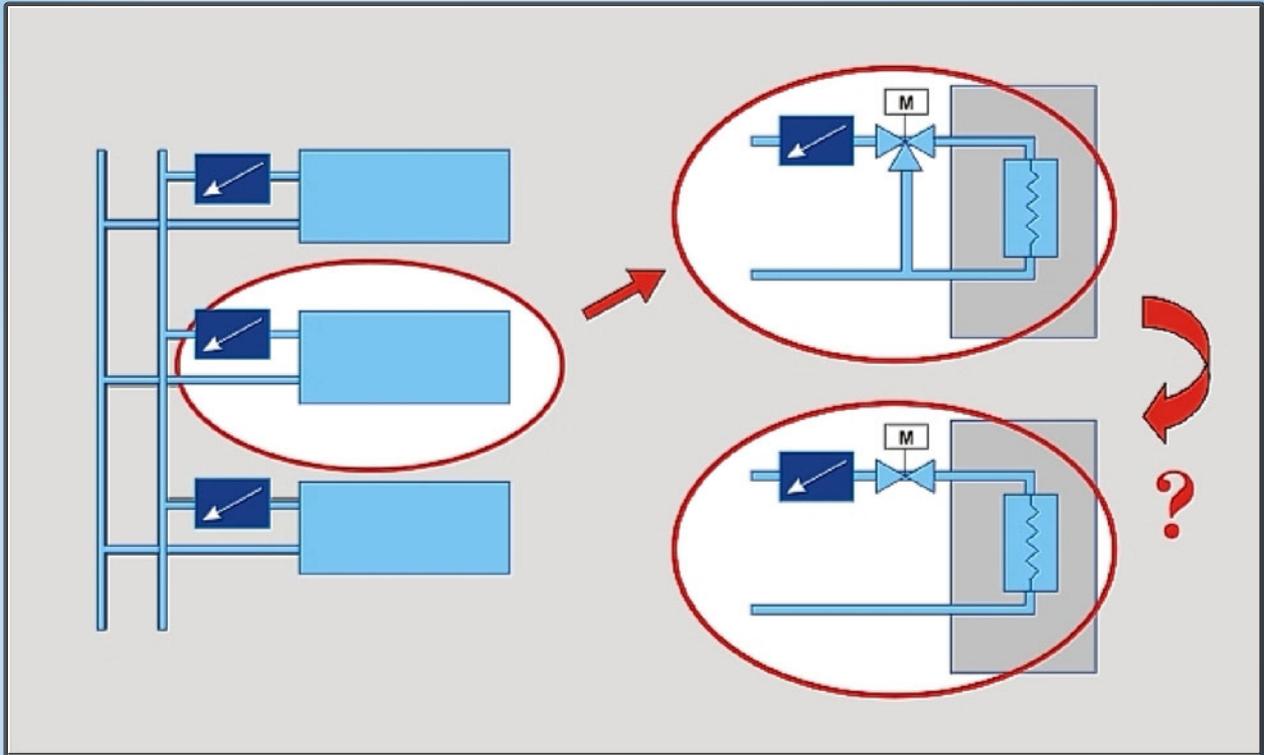
DN 25-50



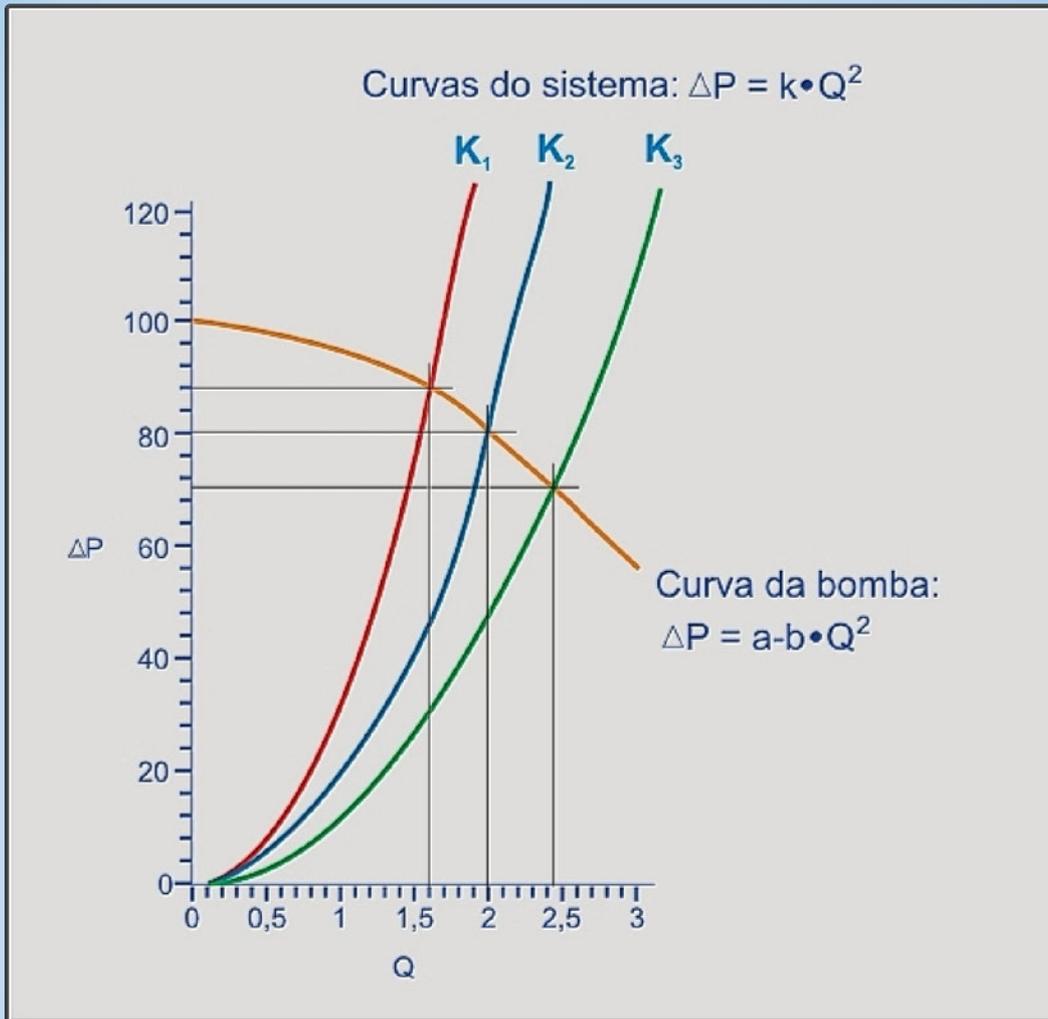
DN 50-800

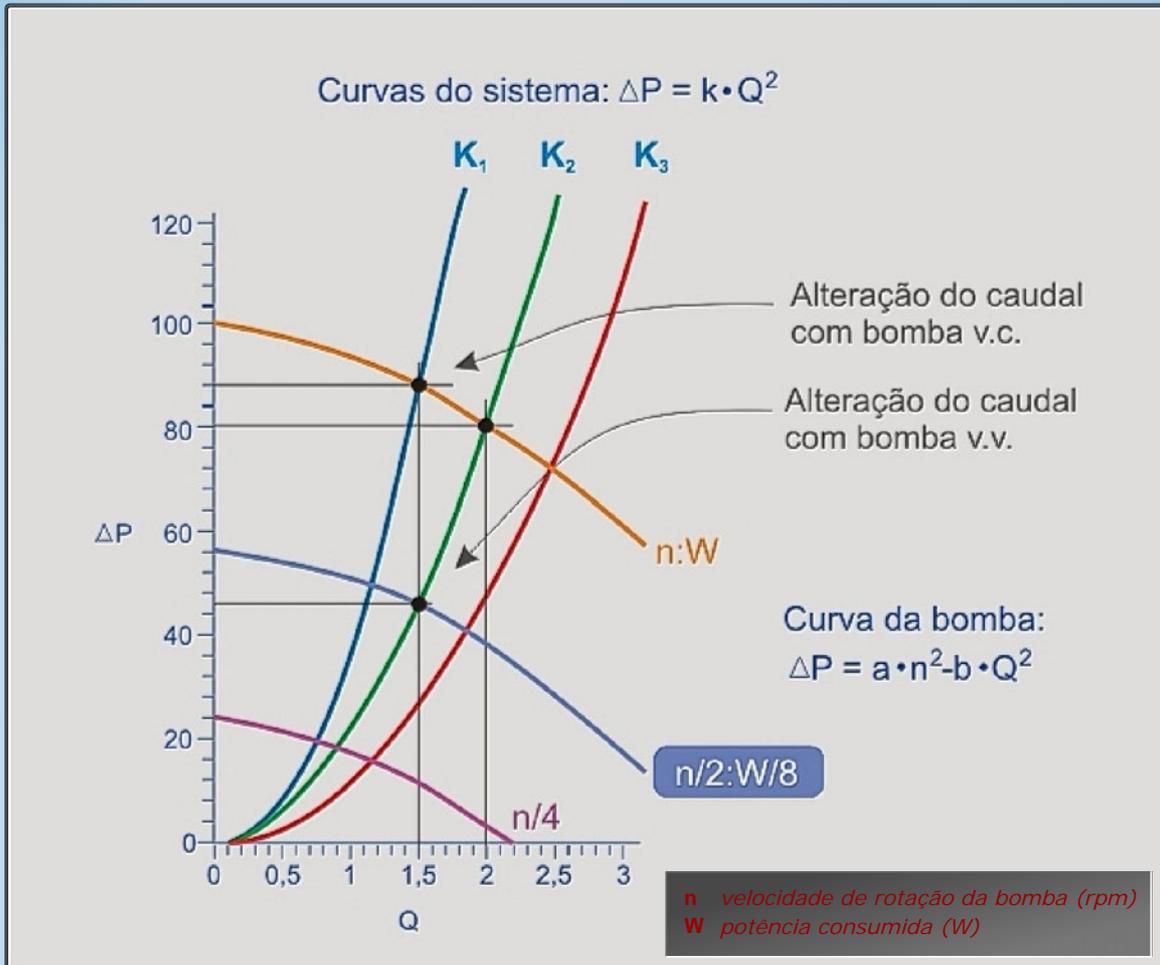


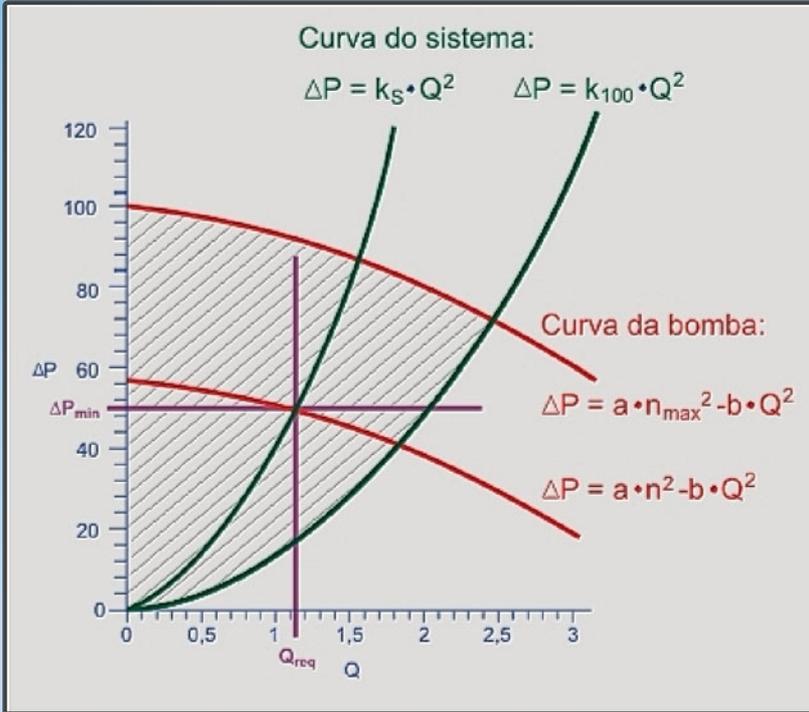
- Ajuste rápido e fácil
- Menor número de válvulas equilibradoras
- Maior facilidade no comissionamento ►► menores custos
- Unidades terminais 100% seguras contra excesso de caudal
- Independência relativamente a erros e imprecisões no cálculo da instalação
- Reajuste dos caudais na instalação sem problemas e a baixo custo
- Precisão superior nos caudais reais
- Grande flexibilidade da instalação em futuras alterações



- Poupanças enormes de energia
- Menor desgaste nas tubagens
- Maior longevidade da instalação
- Menores níveis de ruído







$$Q = n \sqrt{\frac{a}{b+k_S}} \quad \Delta P = n^2 a \frac{k_S}{b+k_S}$$

$$\dot{W} = \frac{Q \Delta P}{\eta} = n^3 \frac{a}{\eta} \sqrt{\frac{a}{b+k_S}} \frac{k_S}{b+k_S}$$

● Todas as válvulas do sistema completamente:

● Fechadas $\rightarrow k_S = \infty$

● Abertas $\rightarrow k_S = k_{100}$

$$k_S = \frac{\Delta P_{min}}{Q_{req}^2} \quad n = \sqrt{\frac{\Delta P_{min} + b Q_{req}^2}{a}}$$

$$\dot{W} = n^3 \frac{a}{\eta} \sqrt{\frac{a}{b+k_s}} \frac{k_s}{b+k_s}$$

$$n = \sqrt{\frac{\Delta P_{\min} + b Q_{\text{req}}^2}{a}}$$

$$k_s = \frac{\Delta P_{\min}}{Q_{\text{req}}^2}$$

$$\eta = f(C_\varrho)$$

$$C_\varrho = \frac{Q}{n D^3}$$

$$Q = n \sqrt{\frac{a}{b+k_s}}$$

$$n = \sqrt{\frac{\Delta P_{\min}}{a} \frac{b+k_s}{k_s}}$$

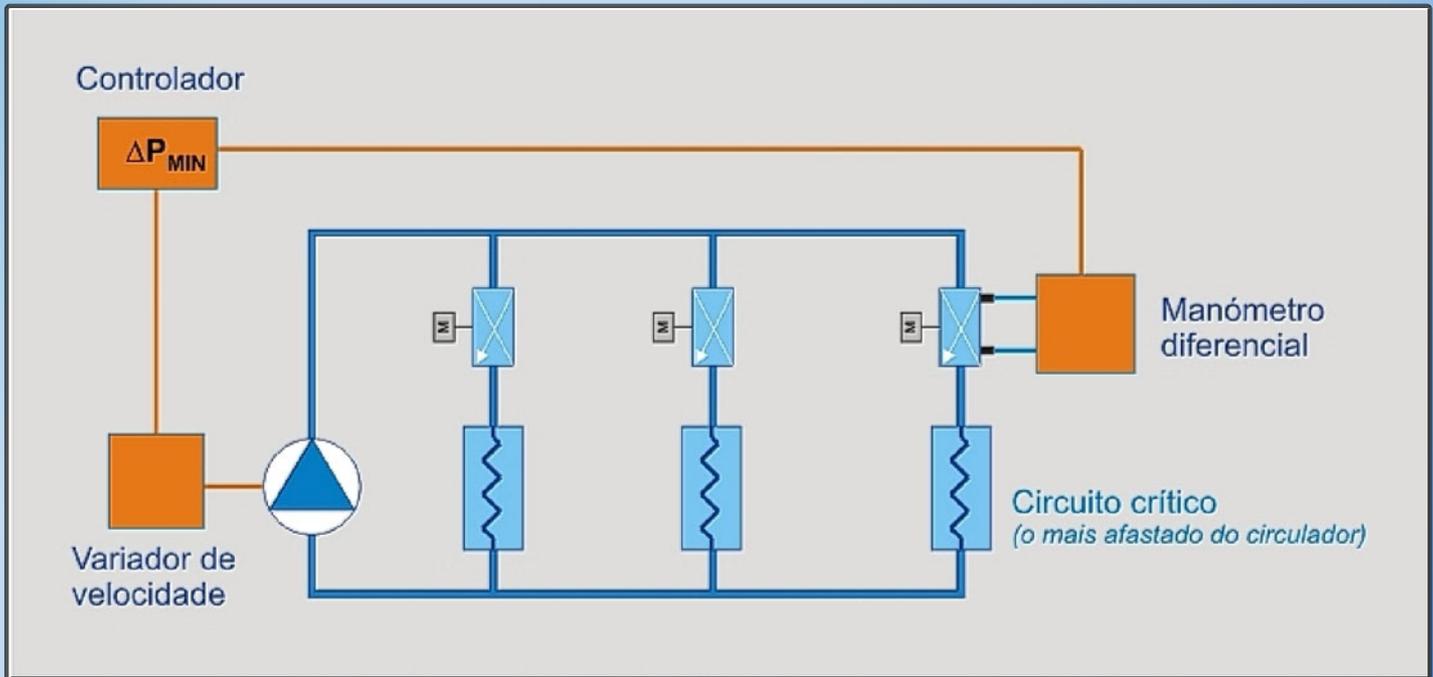
$$\eta \approx a_1 C_\varrho - a_2 C_\varrho^2$$

$$C_\varrho = \frac{1}{D^3} \sqrt{\frac{a}{b+k_s}}$$

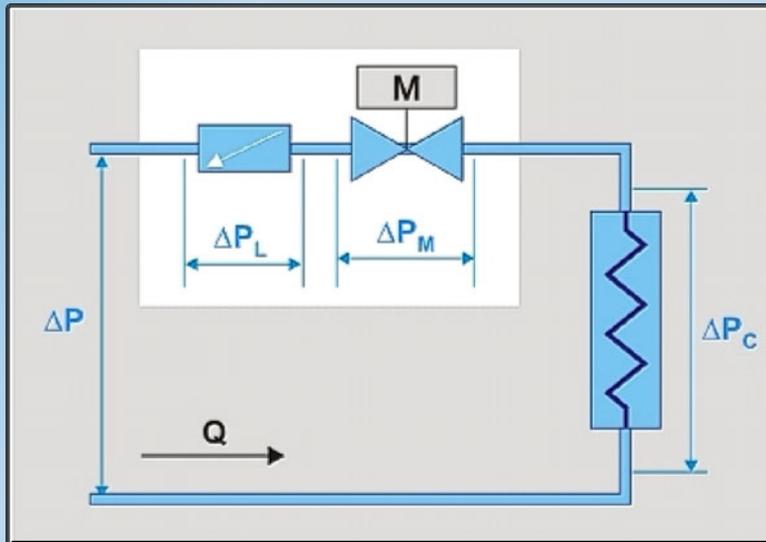
$$\eta = \frac{a_1}{D^3} \sqrt{\frac{a}{b+k_s}} - \frac{a_2}{D^6} \frac{a}{b+k_s}$$

- Para minimizar o consumo de energia o sistema deve ser operado com o menor k_s possível, i.e., com as **válvulas o mais abertas possíveis** desde que compatível com os caudais requeridos em toda a instalação, e com a pressão mínima na bomba.

$$\begin{array}{c}
 \dot{W} = n^3 \frac{a}{\eta} \sqrt{\frac{a}{b+k_s}} \frac{k_s}{b+k_s} \quad \left| \quad \eta = \frac{a_1}{D^3} \sqrt{\frac{a}{b+k_s}} - \frac{a_2}{D^6} \frac{a}{b+k_s} \quad \left| \quad \begin{array}{c} \text{V.V.} \\ n = \sqrt{\frac{\Delta P_{\min}}{a} \frac{b+k_s}{k_s}} \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{c} \text{V.C.} \\ \dot{W} = n^3 a \frac{\frac{k_s}{b+k_s}}{\frac{a_1}{D^3} - \frac{a_2}{D^6} \sqrt{\frac{a}{b+k_s}}} \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{c} \text{V.V.} \\ \dot{W} = \frac{(\Delta P_{\min})^{3/2}}{\sqrt{a}} \frac{\sqrt{\frac{b+k_s}{k_s}}}{\frac{a_1}{D^3} - \frac{a_2}{D^6} \sqrt{\frac{a}{b+k_s}}} \end{array} \\
 \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \\
 \frac{\partial \dot{W}}{\partial k_s} \leq 0
 \end{array}$$



Dois regimes:



$$\Delta P = \Delta P_L + \Delta P_M + \Delta P_C$$

$$Q = K_{VL} \sqrt{\Delta P_L} = K_{VM} \sqrt{\Delta P_M} = K_{VC} \sqrt{\Delta P_C}$$

a) $Q = Q_{Nom}$

Válvula limitadora de caudal em serviço:

$$K_{Min} \leq K_{VL} \leq K_{Max}$$

b) $Q \leq Q_{Nom}$

Válvula limitadora de caudal toda aberta:

$$K_{VL} = K_{Max}$$

Válvula modulante em serviço:

$$0 \leq K_{VM} \leq K_{VS}$$

$$Q = Q_{Nom} ; \Delta P_{MIN} \leq \Delta P_{VL} \leq \Delta P_{MAX} ; K_{MIN} \leq K_{VL} \leq K_{MAX}$$

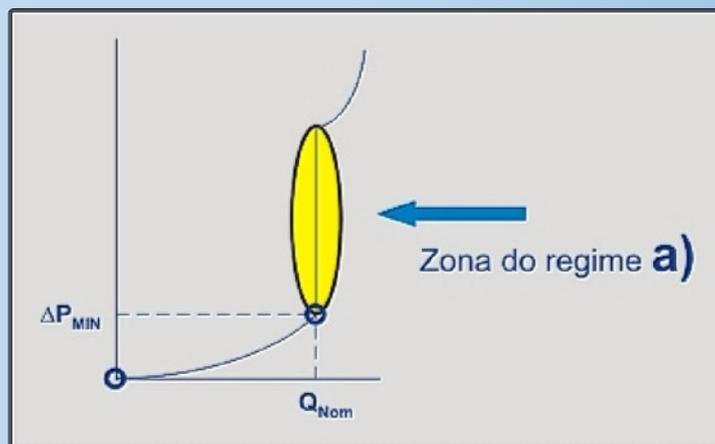
$$\Delta P_M = \frac{Q_{Nom}^2}{K_{VM}^2}$$

$$\Delta P_C = \frac{Q_{Nom}^2}{K_{VC}^2}$$

$$\Delta P_L = \Delta P - \Delta P_M - \Delta P_C$$

$$K_L = \frac{Q_{Nom}}{\sqrt{\Delta P_L}} = \frac{Q_{Nom}}{\sqrt{\Delta P - \Delta P_M - \Delta P_C}}$$

$$\Delta P_{MIN} \leq \Delta P_L \leq \Delta P_{MAX}$$



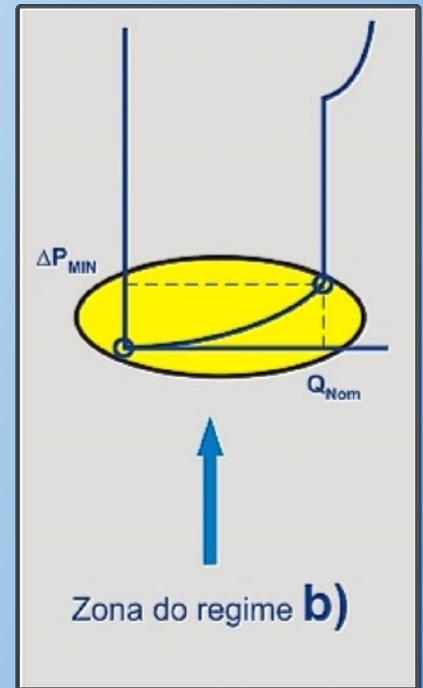
$$Q \leq Q_{Nom} ; \Delta P_L \leq \Delta P_{MIN} ; K_{VL} = K_{MAX}$$

$$\Delta P_M = \frac{K_{MAX}^2 K_{VC}^2}{K_{MAX}^2 K_{VM}^2 + K_{MAX}^2 K_{VC}^2 + K_{VM}^2 K_{VC}^2} \Delta P$$

$$\Delta P_L = \frac{K_{VM}^2 K_{VC}^2}{K_{MAX}^2 K_{VM}^2 + K_{MAX}^2 K_{VC}^2 + K_{VM}^2 K_{VC}^2} \Delta P$$

$$\Delta P_C = \frac{K_{MAX}^2 K_{VM}^2}{K_{MAX}^2 K_{VM}^2 + K_{MAX}^2 K_{VC}^2 + K_{VM}^2 K_{VC}^2} \Delta P$$

$$Q = \frac{K_{MAX} K_{VM} K_{VC}}{\sqrt{K_{MAX}^2 K_{VM}^2 + K_{MAX}^2 K_{VC}^2 + K_{VM}^2 K_{VC}^2}} \sqrt{\Delta P}$$

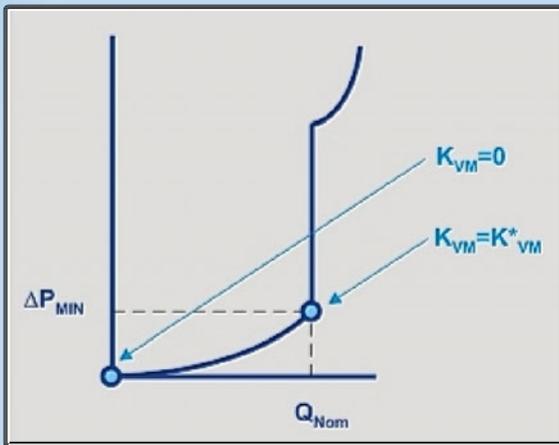




1) No regime b) o caudal é sensível a flutuações na pressão

$$Q = \frac{K_{MAX} K_{VM} K_{VC}}{\sqrt{K_{MAX}^2 K_{VM}^2 + K_{MAX}^2 K_{VC}^2 + K_{VM}^2 K_{VC}^2}} \sqrt{\Delta P}$$

2) Para atingir o regime b), a válvula modulante tem que absorver todo o excesso de pressão $\Delta P - \Delta P_{MIN} - \Delta P_C$. Isto resulta num curso limitado para efectuar o controlo.

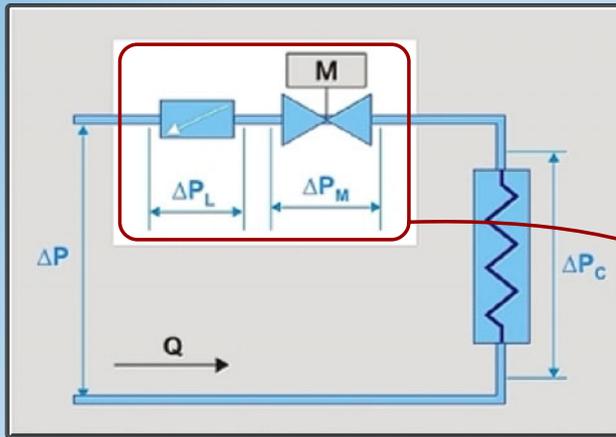


$$\Delta P_M = \Delta P - \Delta P_{MIN} - \Delta P_C \Rightarrow$$

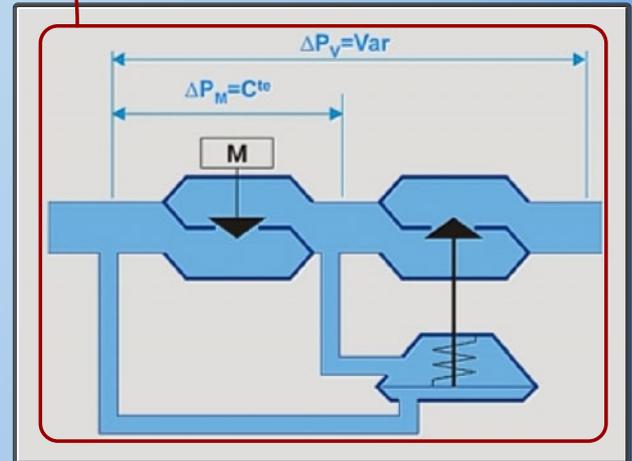
$$\frac{Q_{Nom}^2}{K_{VM}^{*2}} = \Delta P - \Delta P_{MIN} - \frac{Q_{Nom}^2}{K_{VC}^2}$$

$$\frac{1}{K_{VM}^{*2}} = \frac{\Delta P - \Delta P_{MIN}}{Q_{Nom}^2} - \frac{1}{K_{VC}^2}$$

$$0 \leq K_{VM}^* \leq K_{VS}$$



● Esquema de princípio



$$\Delta P_M = C^{te} \Rightarrow Q = K_{VM} \sqrt{\Delta P_M}$$

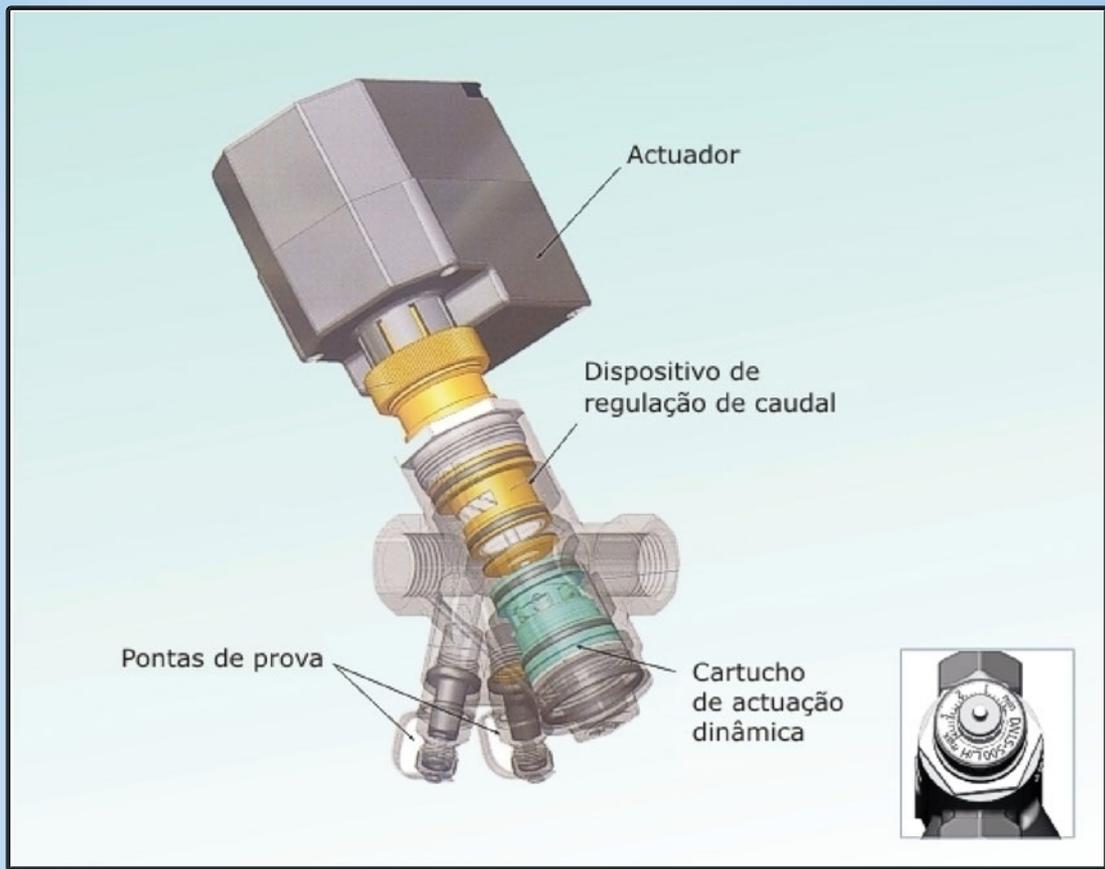
Caudal não depende de ΔP_V (ou ΔP)

$$\Delta P_M = C^{te}$$

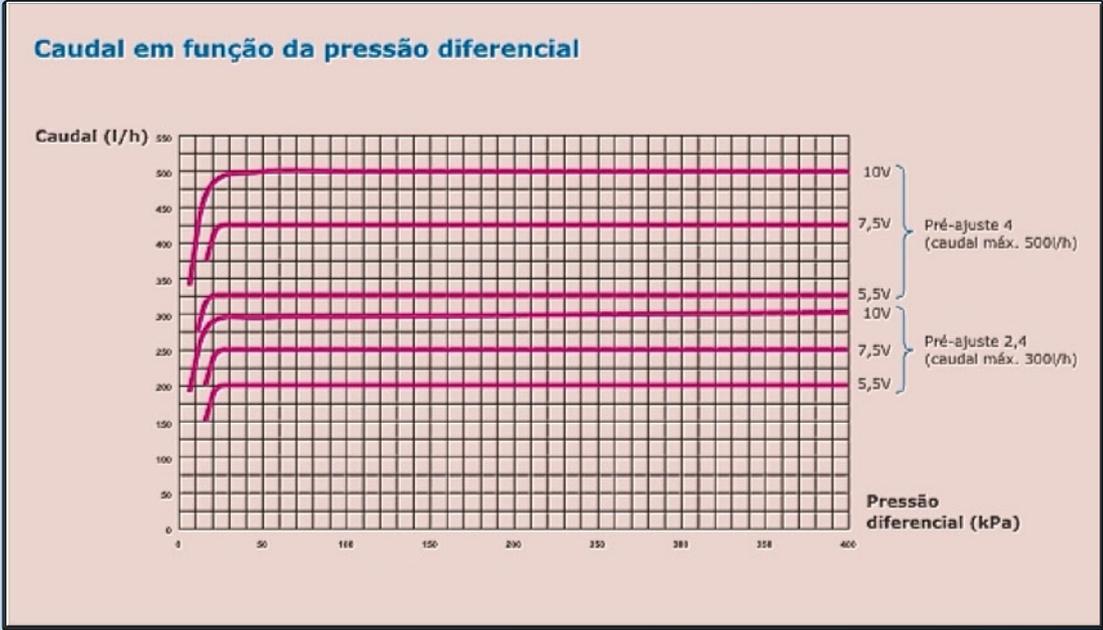
$$Q = K_{VM} \sqrt{\Delta P_M}$$

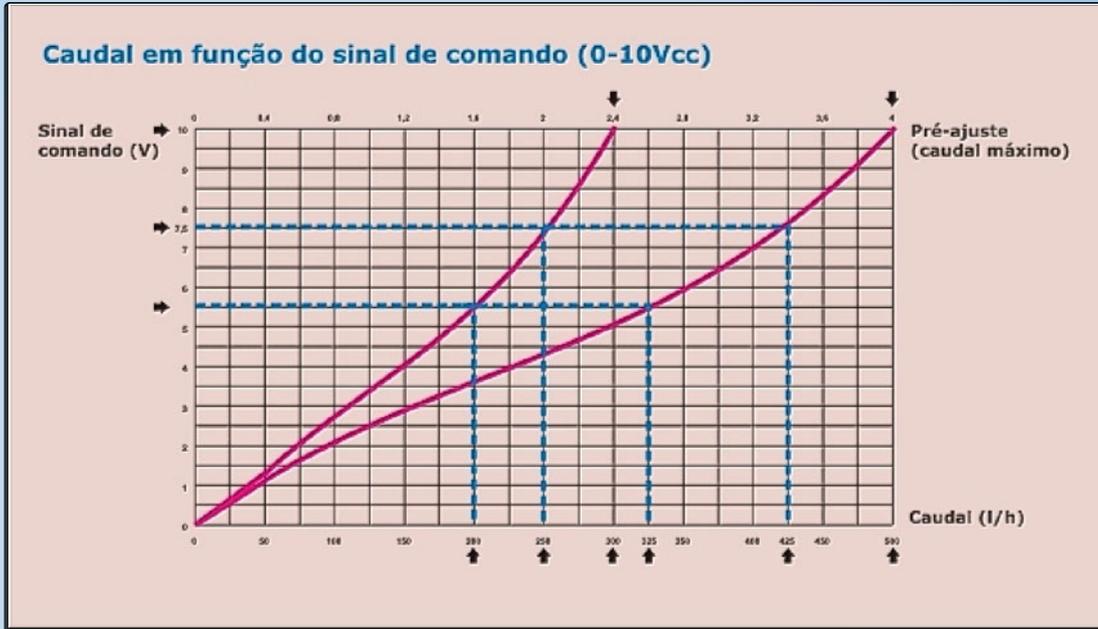
- Caudal (Q) é directamente proporcional à abertura da válvula (K_{VM}) e independente das flutuações de pressão, não só do próprio circuito como dos circuitos vizinhos.



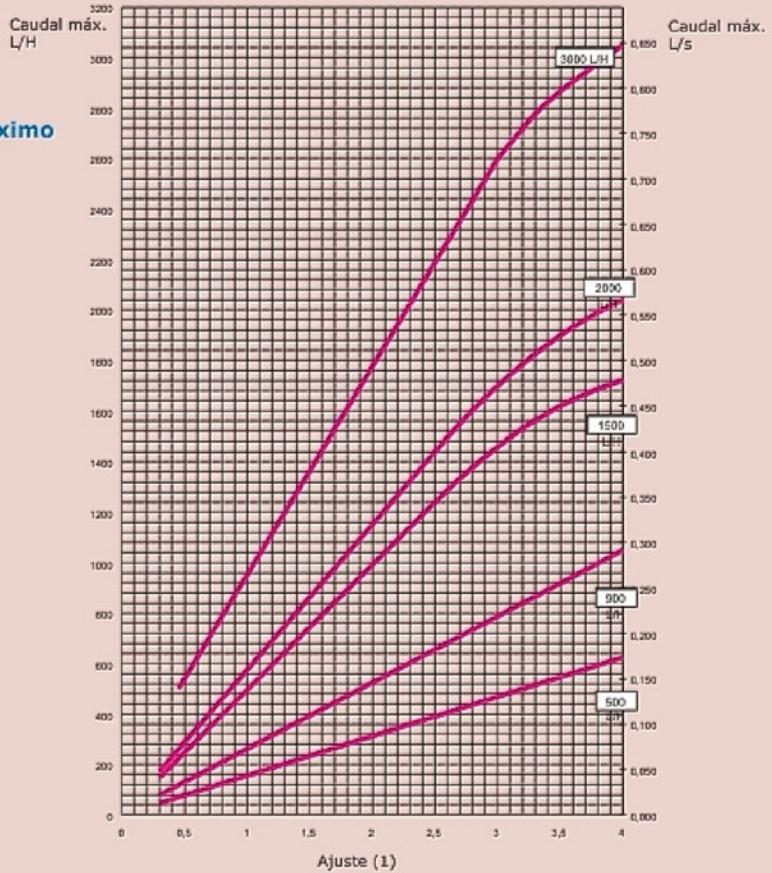


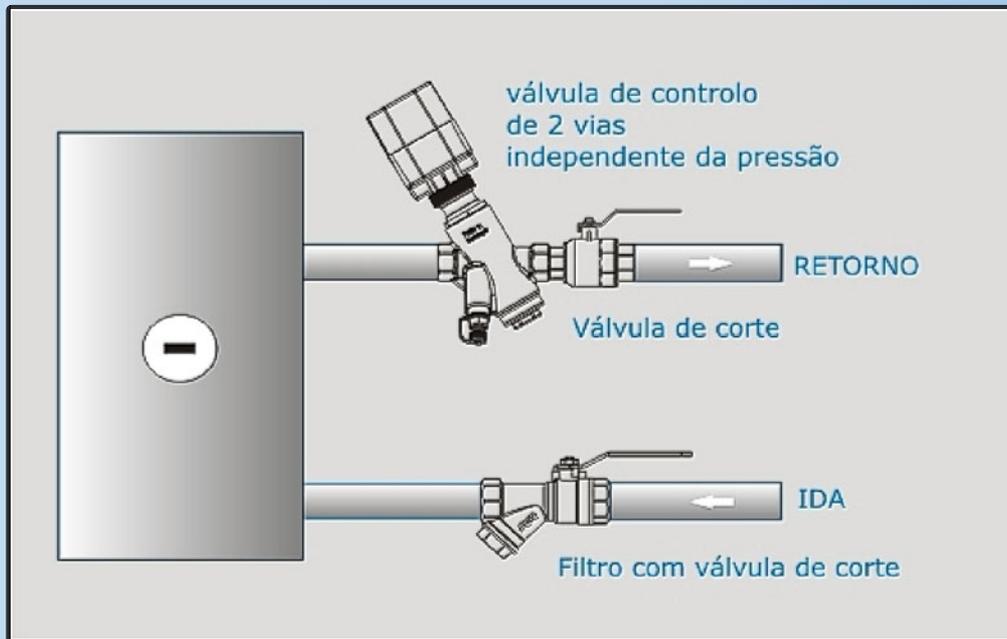
Video
Desenho





Frese Optima DN15/20/25/32
Gráficos de ajuste do caudal máximo





- O pré-ajuste do caudal máximo não afecta o curso da haste; obtem-se sempre o máximo curso o que é garantia de uma autoridade a 100% sobre o caudal.
- O limite dinâmico do caudal elimina caudais excessivos independentemente da variação de pressão no sistema.
- A limpeza da instalação pode ser feita com a válvula instalada devido à possibilidade de remoção do cartucho - responsável pela limitação dinâmica do caudal.
- Actuador modulante standard (24Vca, 0-10Vcc)
- Gama de pressão diferencial desde 15kPa até 400kPa
- Curso da haste que regula o índice de caudal 5,5mm
- Ajuste contínuo do caudal máximo desde 15% a 100% do caudal nominal.

Projecto

Menos tempo na escolha e selecção dos componentes necessários ao equilíbrio hidráulico.

Não é necessário calcular a autoridade da válvula de controlo.

Segurança nos caudais a ajustar na instalação.

Flexibilidade do sistema a eventuais modificações posteriores.

Instalação

São desnecessárias quaisquer válvulas de equilíbrio complementares no resto da instalação.

Menor número de válvulas a instalar.

Menos tempo no arranque da instalação.

Limpeza simplificada graças ao cartucho removível.

Liberdade total dos locais de montagem
- não são necessários troços de tubo recto
nem a montante nem a jusante.

Operação

Elevado nível de conforto para o utilizador final devido ao controlo correcto da temperatura ambiente.

Menor consumo devido à estabilidade operacional e à rápida adaptação às variações do sistema.

Tempo de vida alargada devido ao menor número de operações a que está sujeito o actuador.

