

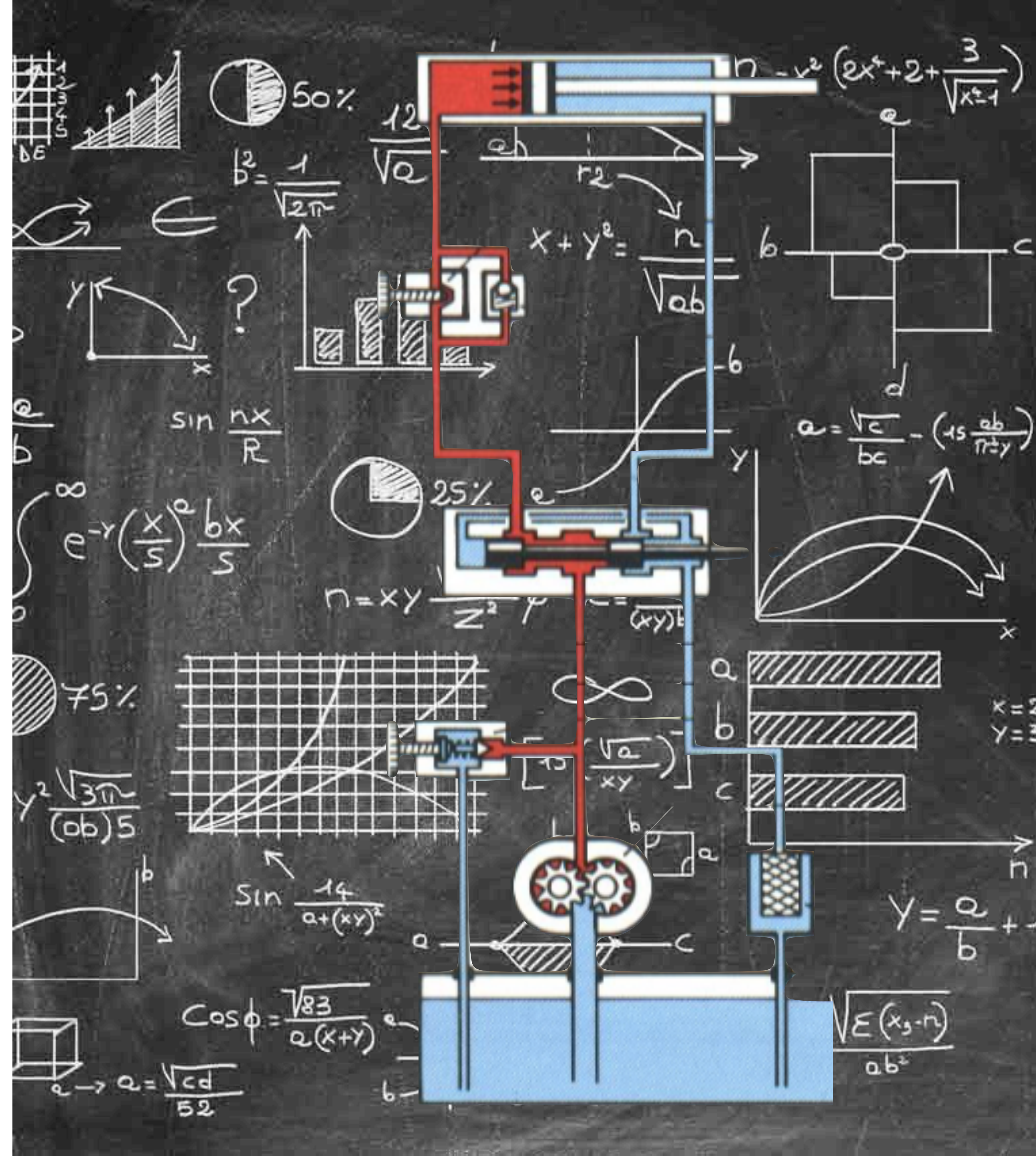
SEM0540

Elementos de Automação

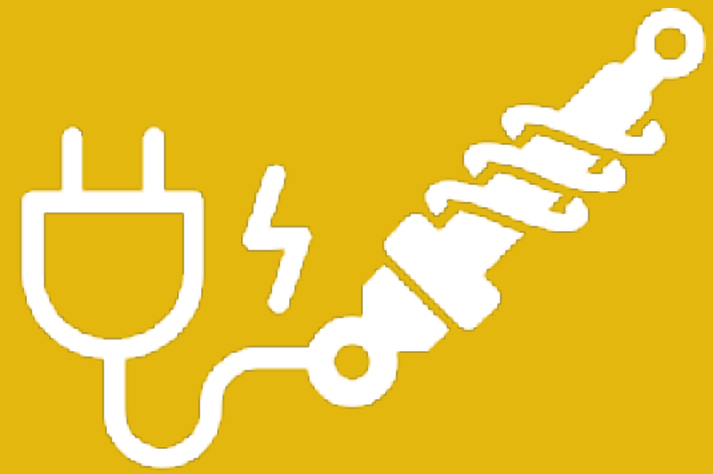
Aula #8: Circuitos hidráulicos

Prof. Dr. Thiago Boaventura

tboaventura@usp.br

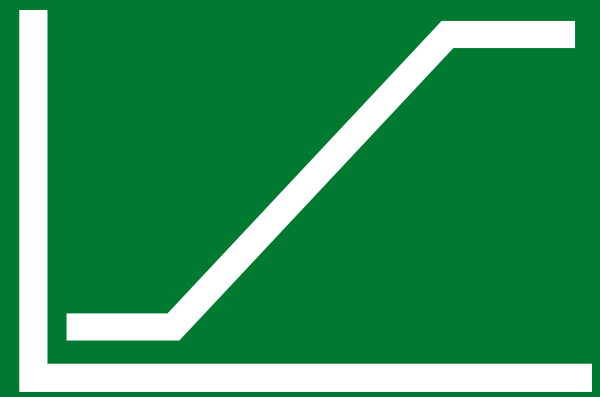


Conteúdo



- Circuitos hidráulicos
- Circuitos eletrohidráulicos

Circuitos
hidráulicos



- Modelo não-linear
- Modelo linear

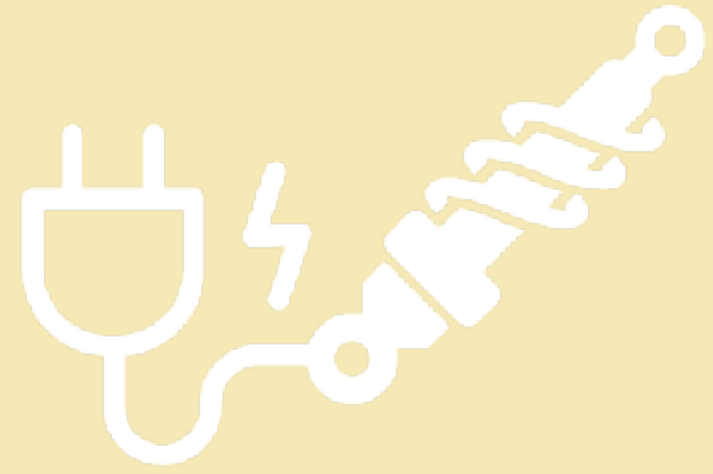
Modelagem



- Bibliografia
- Próxima aula...

Conclusão

Conteúdo



- Circuitos hidráulicos
- Circuitos eletrohidráulicos

Circuitos
hidráulicos

Modelagem

Conclusão

Circuito hidráulico #1

Circuitos
hidráulicos

Modelagem

Conclusão

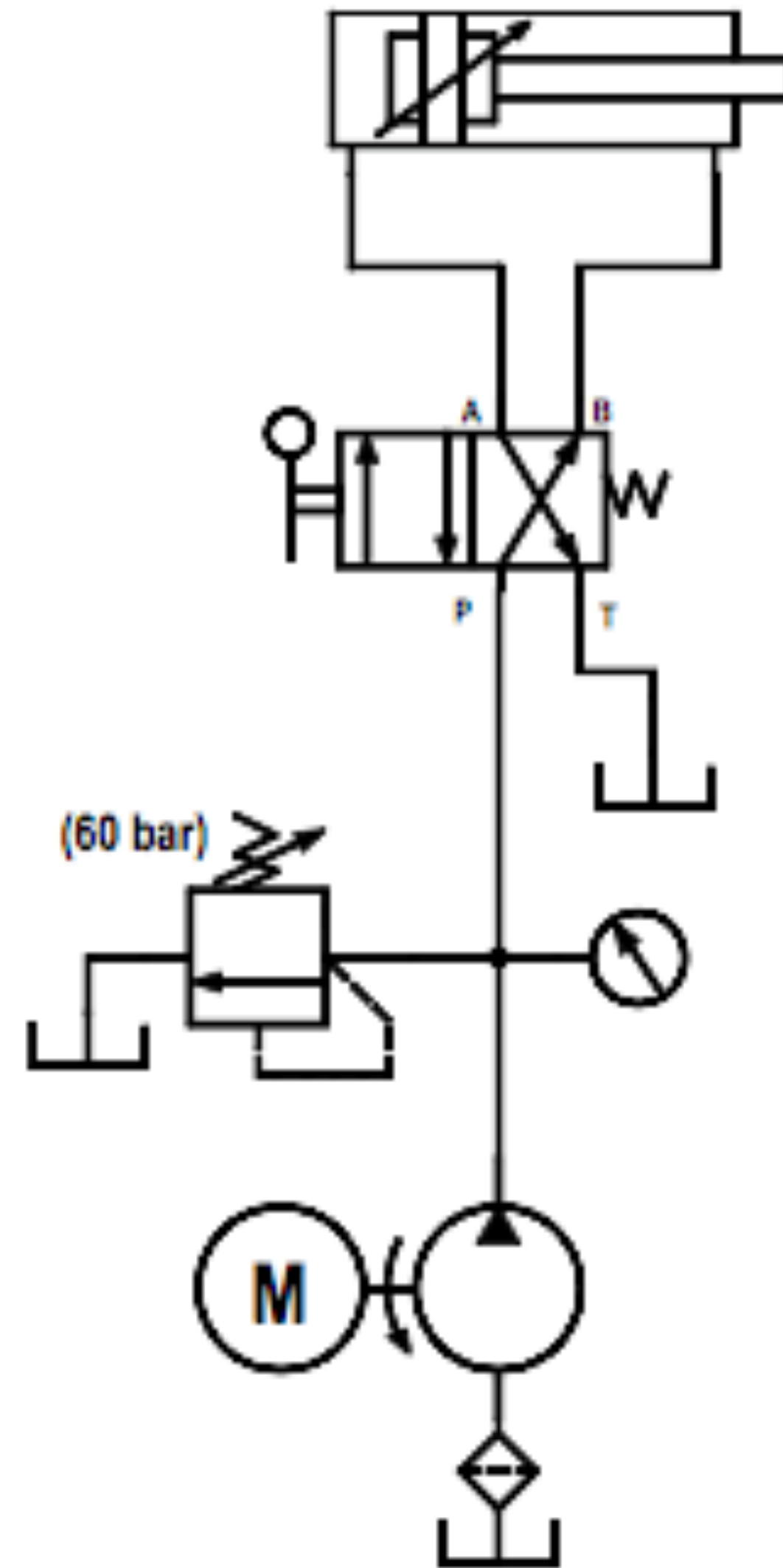
Um cilindro de ação dupla deve avançar, mediante o acionamento da alavanca de uma válvula direcional. Soltando-se a alavanca, o cilindro deve retornar a sua posição inicial.

Circuito hidráulico #1

Circuitos
hidráulicos

Modelagem

Conclusão



Circuito hidráulico #3

Circuitos
hidráulicos

Modelagem

Conclusão

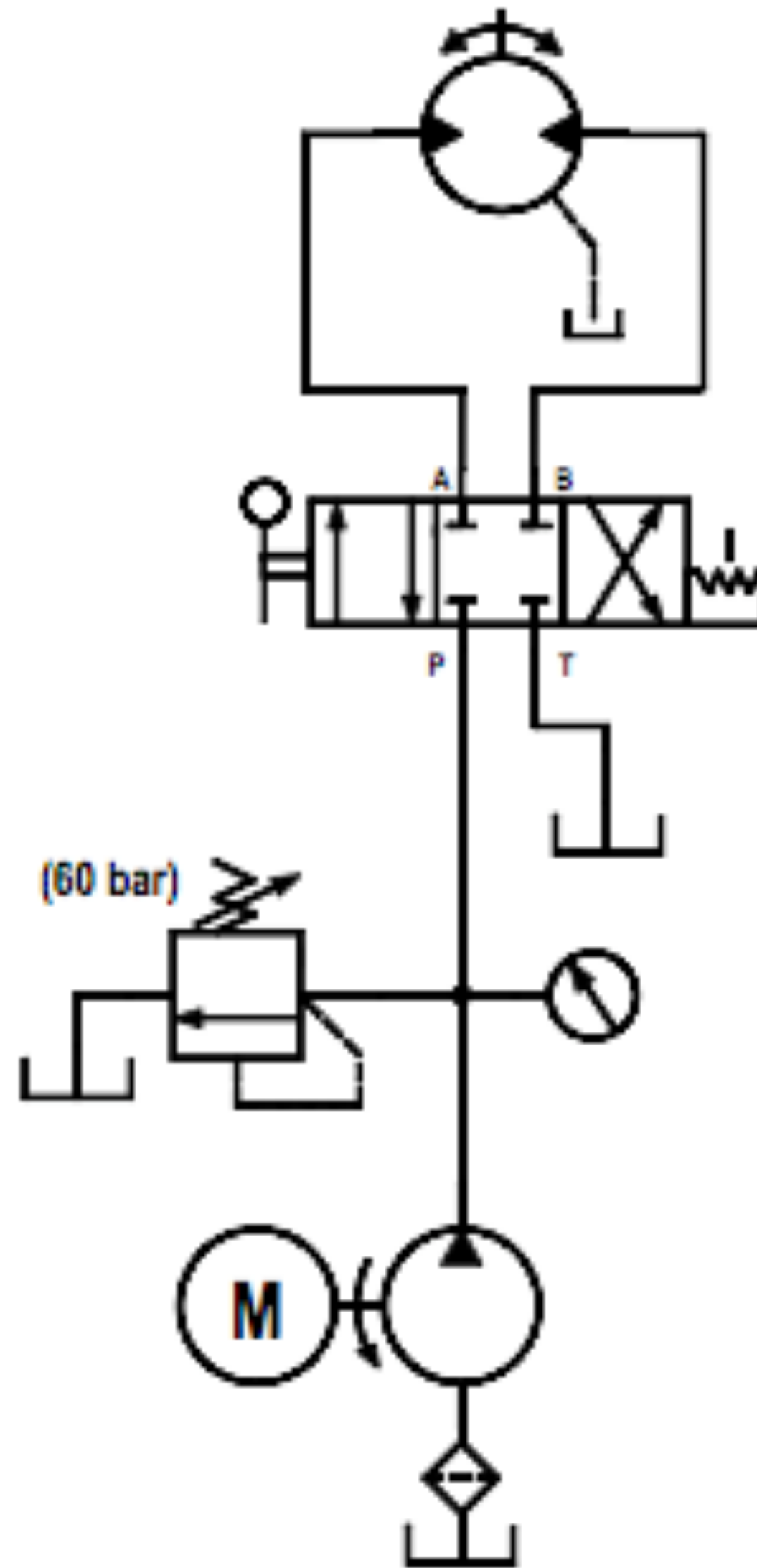
O eixo de um motor hidráulico reversível deve girar em ambos os sentidos de rotação e parar, sob o comando de uma válvula direcional.

Circuito hidráulico #3

Circuitos
hidráulicos

Modelagem

Conclusão



Circuito hidráulico #4

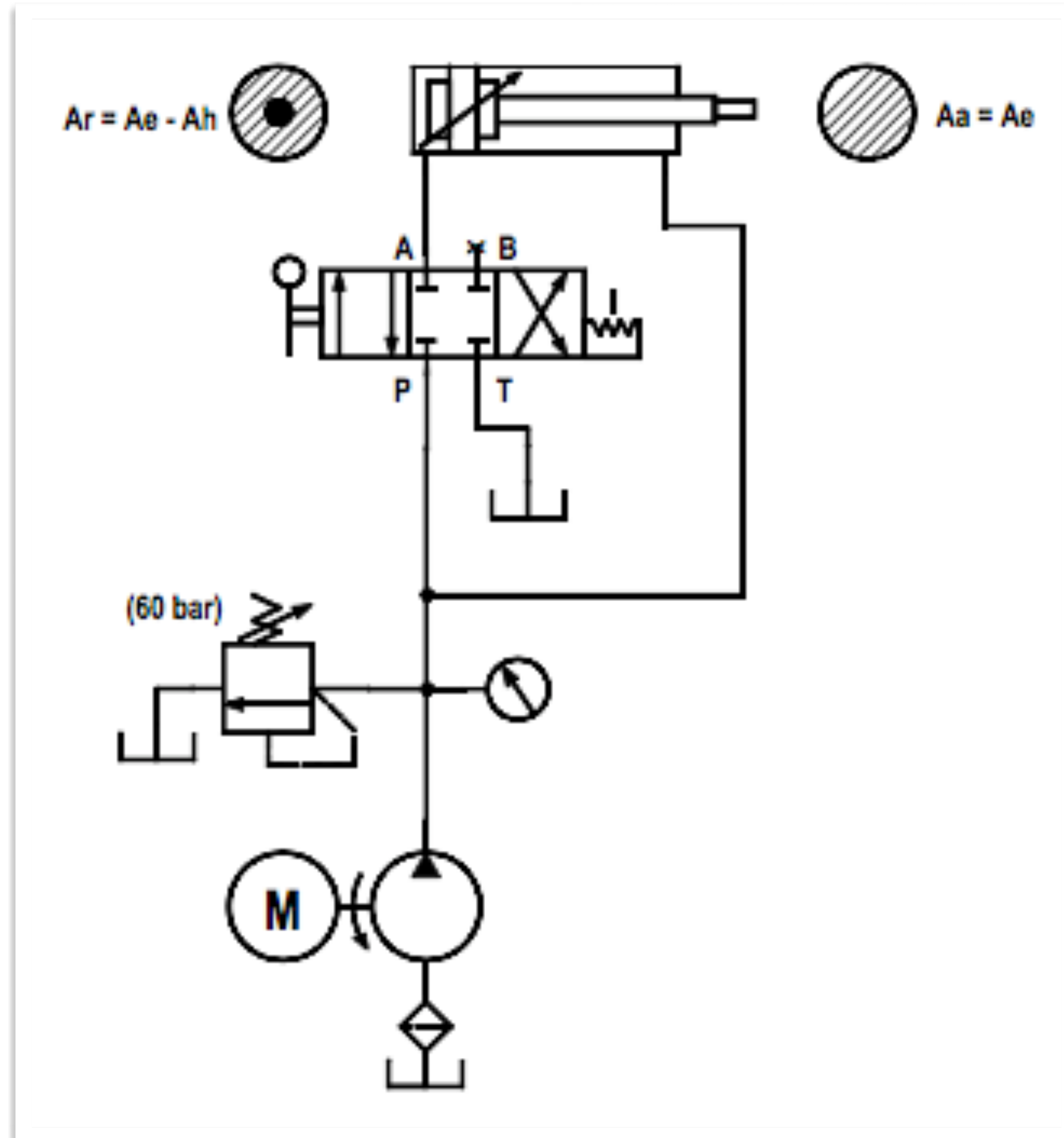
Circuitos
hidráulicos

Modelagem

Conclusão

Por meio de um circuito regenerativo, um cilindro hidráulico, com diferencial de áreas de 2 para 1, deve se movimentar apresentando forças e velocidades iguais, tanto no avanço como no retorno

Circuito hidráulico #4



Circuito hidráulico #9

Circuitos
hidráulicos

Modelagem

Conclusão

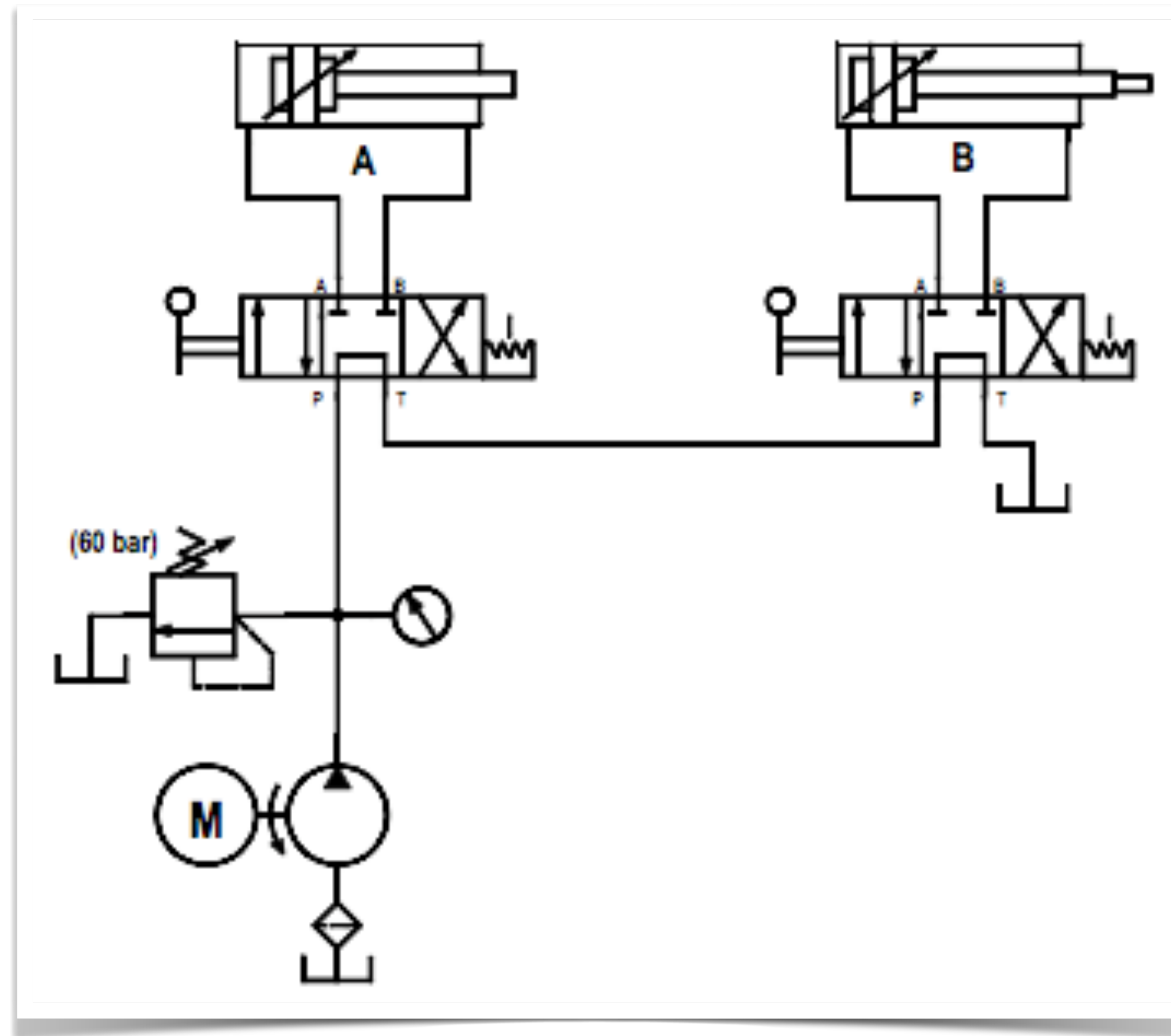
Dois cilindros hidráulicos deverão se movimentar de forma independente. Porém, o comando somente poderá ser efetuado para um cilindro de cada vez. (Circuito em série)

Circuito hidráulico #9

Circuitos
hidráulicos

Modelagem

Conclusão



Circuito hidráulico #12

Circuitos
hidráulicos

Modelagem

Conclusão

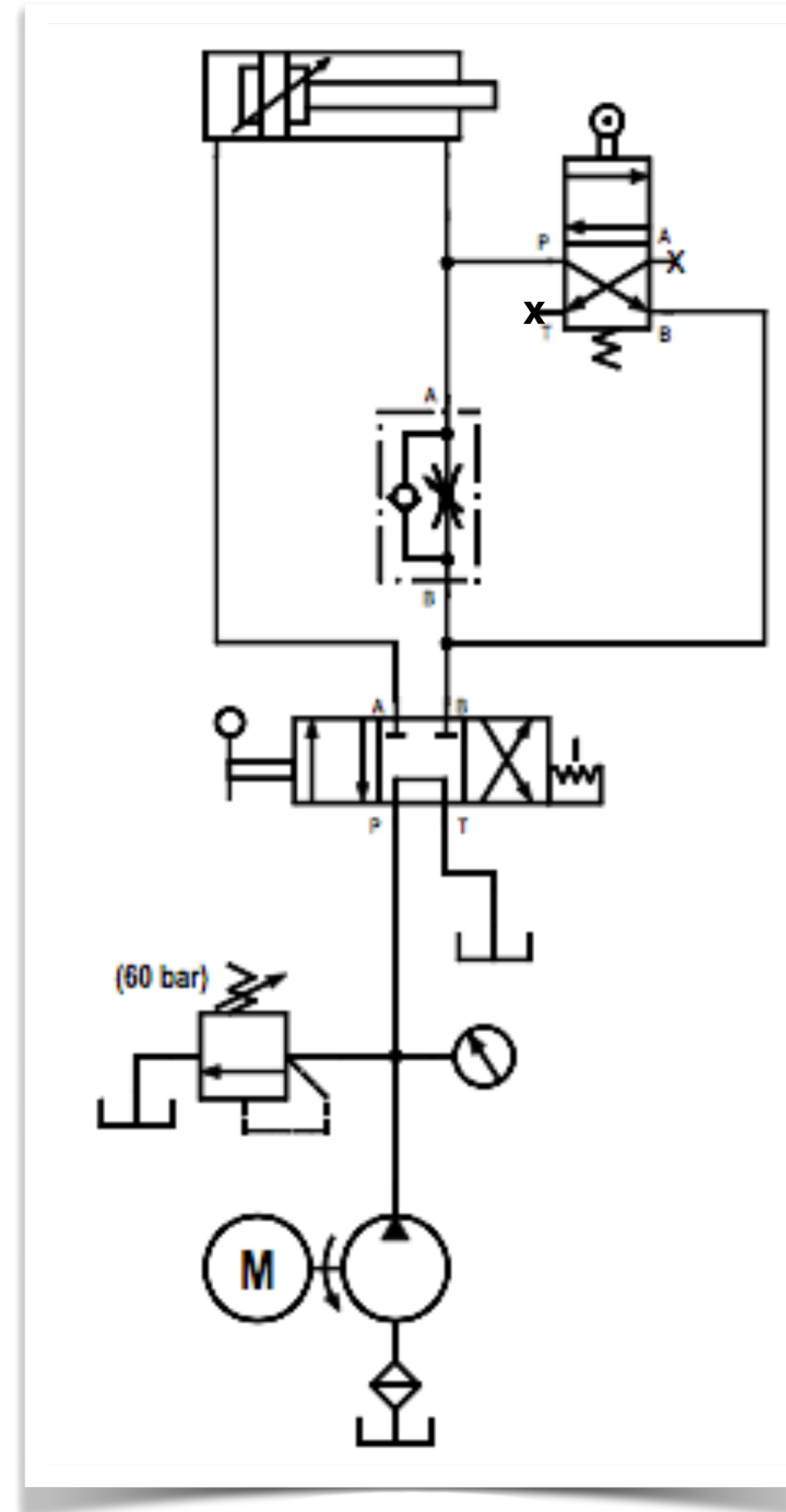
Um cilindro hidráulico que movimentava um cabeçote de usinagem deve avançar rapidamente, aproximando a ferramenta da peça a ser usinada, prosseguir num avanço lento, compatível com a velocidade de corte da ferramenta, e retornar rápido, extraindo a ferramenta de dentro da peça.

Circuito hidráulico #12

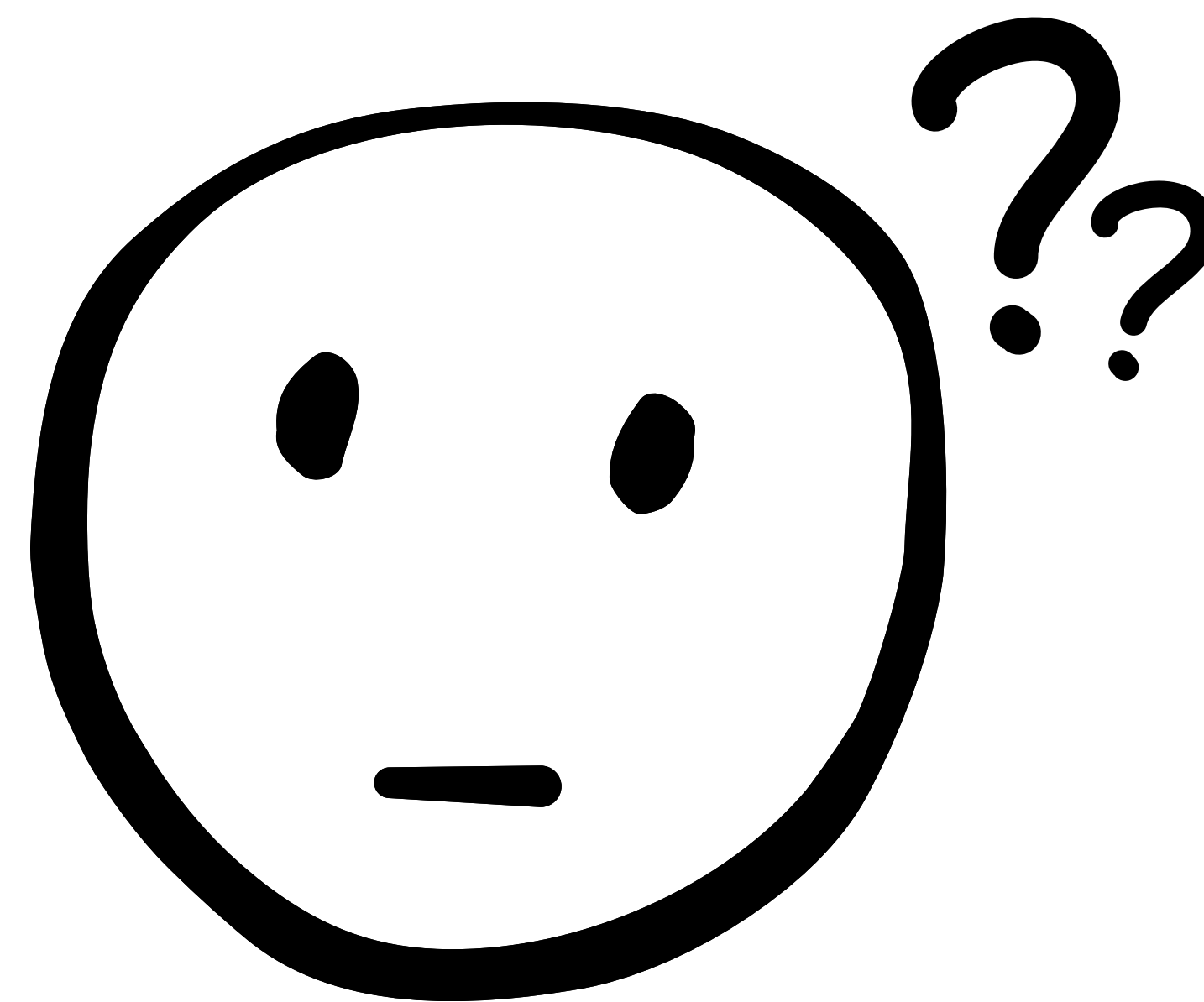
Circuitos
hidráulicos

Modelagem

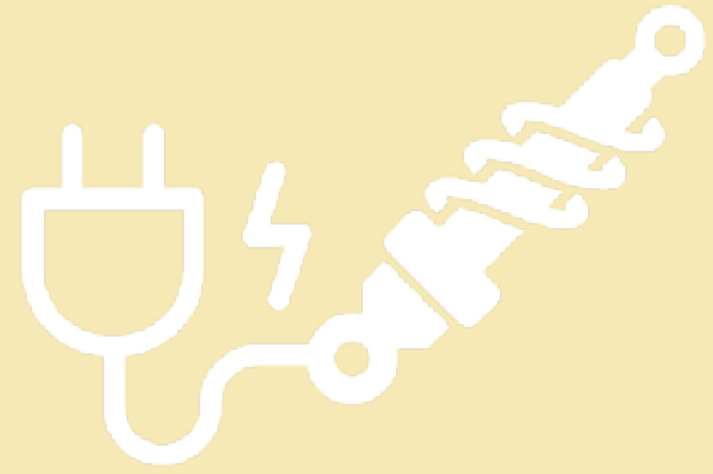
Conclusão



Alguma
dúvida?



Conteúdo



- Circuitos hidráulicos
- **Circuitos eletrohidráulicos**

Circuitos
hidráulicos

Modelagem

Conclusão

Circuitos eletro-hidráulicos #14

Circuitos
hidráulicos

Modelagem

Conclusão

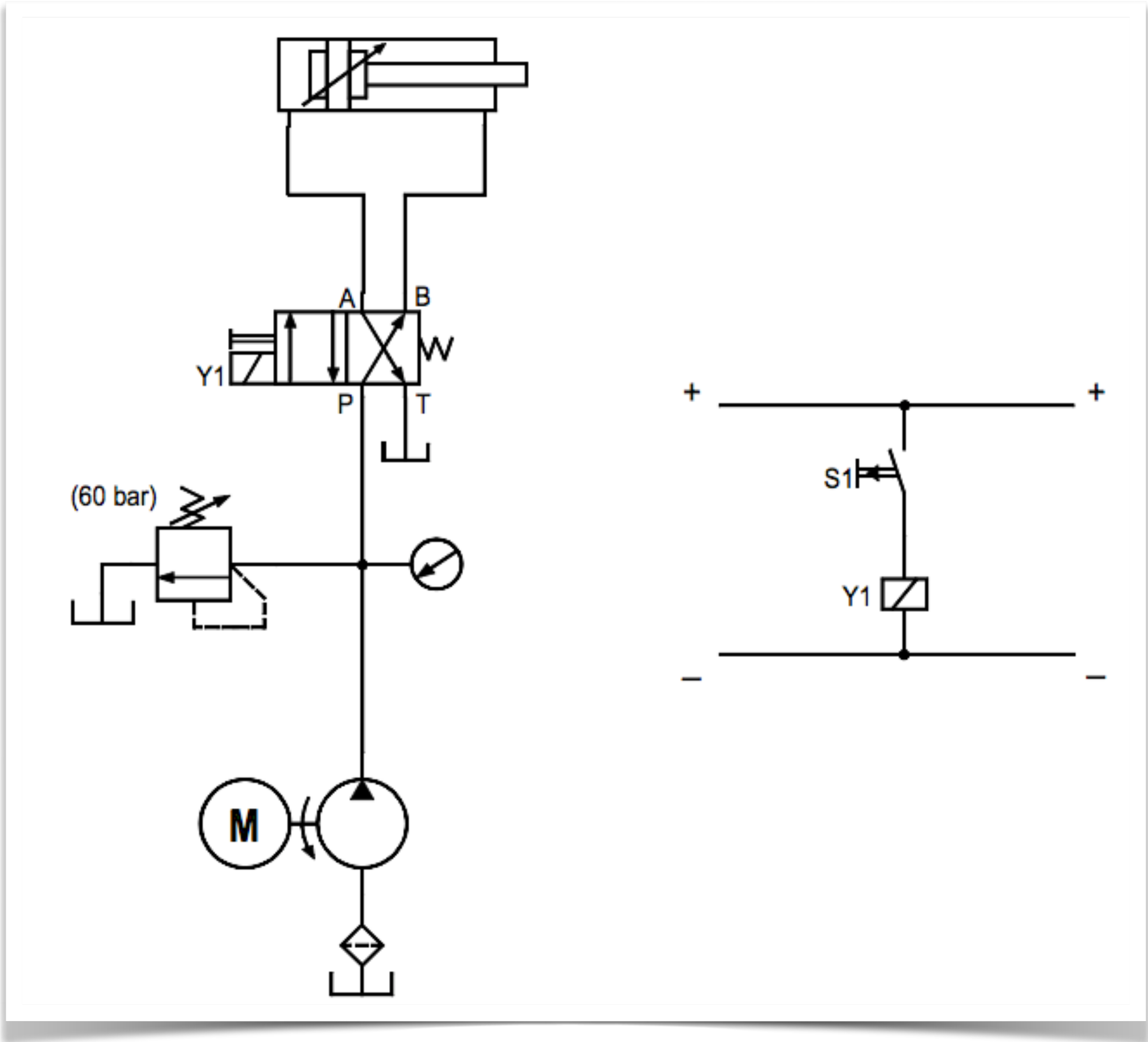
Ao acionarmos um botão de comando, um cilindro hidráulico de ação dupla deve avançar, enquanto mantivermos o botão acionado. Ao soltarmos o botão, o cilindro deve retornar a sua posição inicial.

Circuitos eletro-hidráulicos #14

Circuitos hidráulicos

Modelagem

Conclusão



Circuitos eletro-hidráulicos #15

Circuitos
hidráulicos

Modelagem

Conclusão

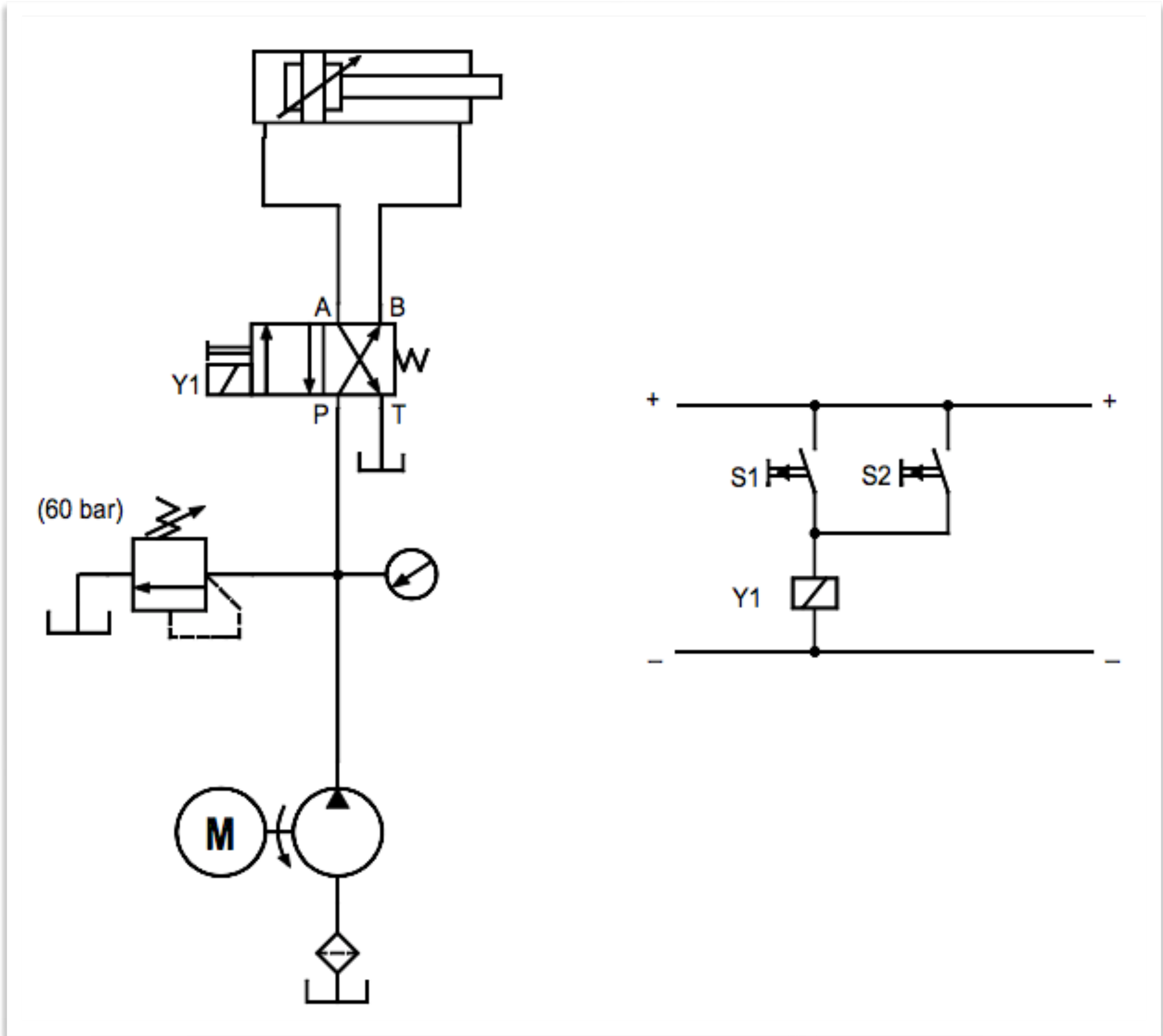
Um cilindro de ação dupla deve poder ser acionado de dois locais diferentes e distantes entre si como, por exemplo, no comando de um elevador de cargas que pode ser acionado tanto do solo como da plataforma.

Circuitos eletro-hidráulicos #15

Circuitos hidráulicos

Modelagem

Conclusão



Circuitos eletro-hidráulicos #16

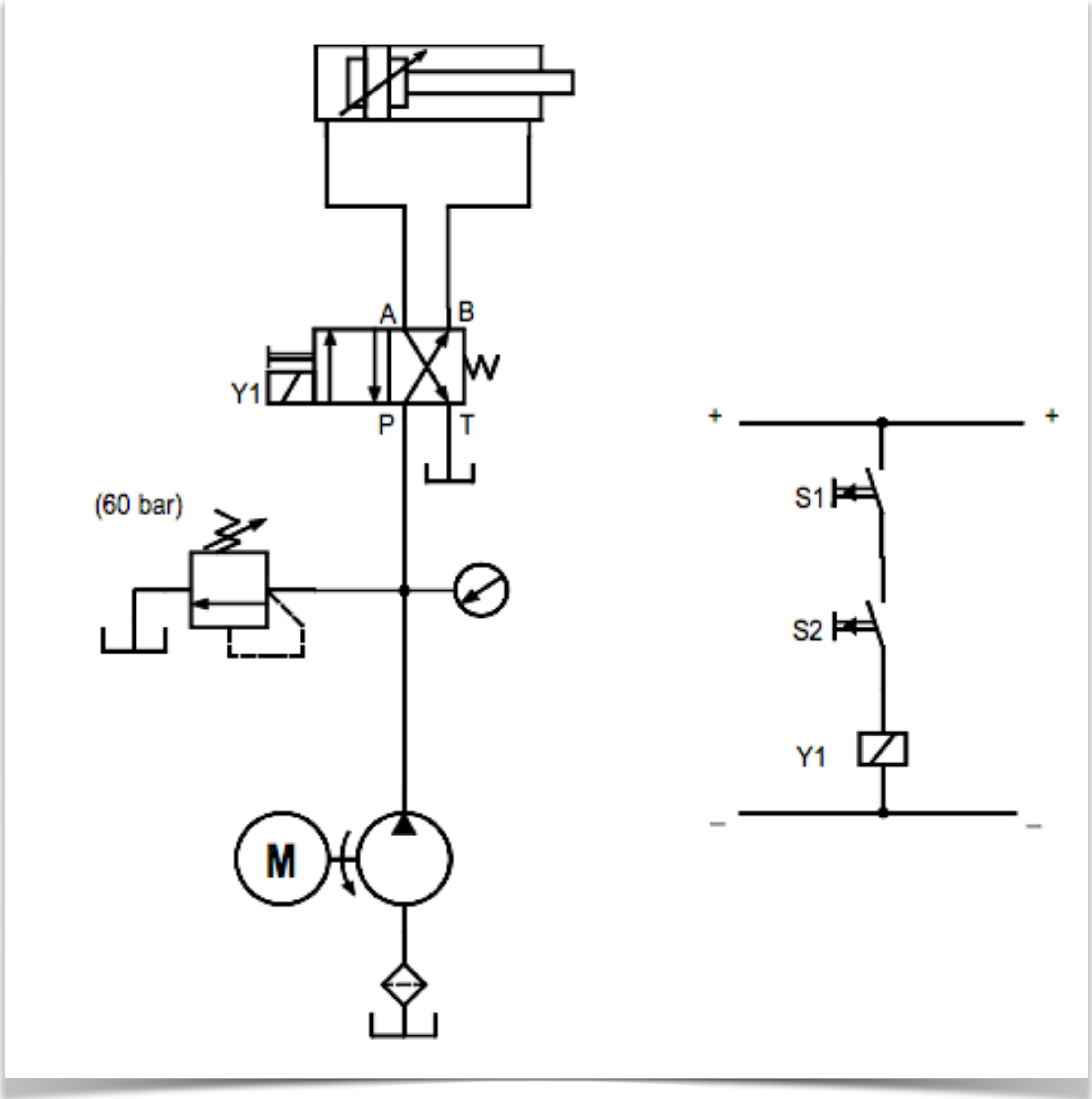
Um cilindro de ação dupla deve avançar somente quando dois botões de comando forem acionados simultaneamente (comando bi-manual). Soltando-se qualquer um dos dois botões de comando, o cilindro deve voltar imediatamente a sua posição inicial.

Circuitos eletro-hidráulicos #16

Circuitos hidráulicos

Modelagem

Conclusão



Circuitos eletro-hidráulicos #18

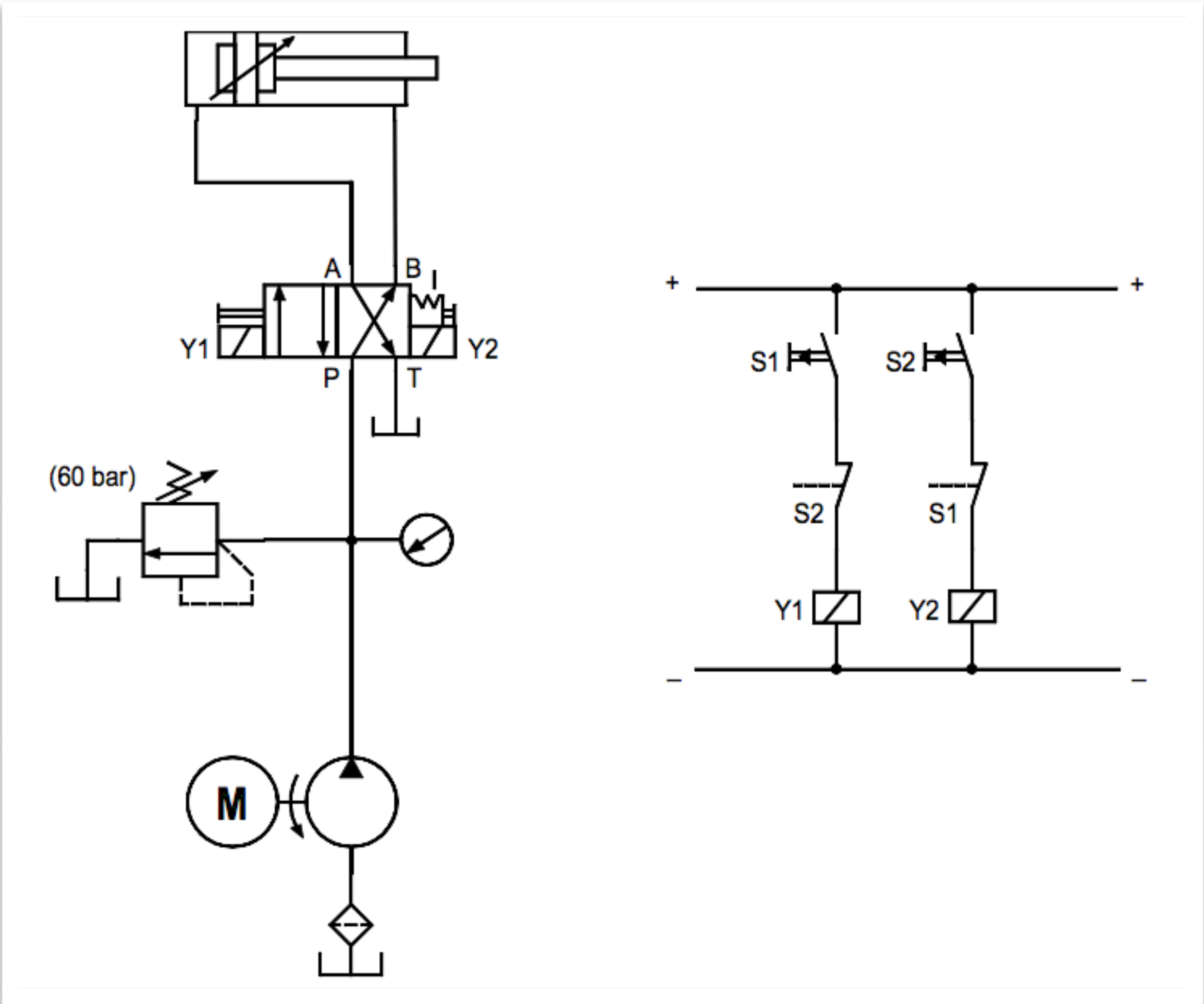
Um cilindro de ação dupla deve ser acionado por dois botões. Acionando-se o primeiro botão o cilindro deve avançar e permanecer avançando mesmo que o botão seja desacionado. O retorno deve ser comandado por meio de um pulso no segundo botão.

Circuitos eletro-hidráulicos #18

Circuitos hidráulicos

Modelagem

Conclusão



Circuitos eletro-hidráulicos #19

Circuitos
hidráulicos

Modelagem

Conclusão

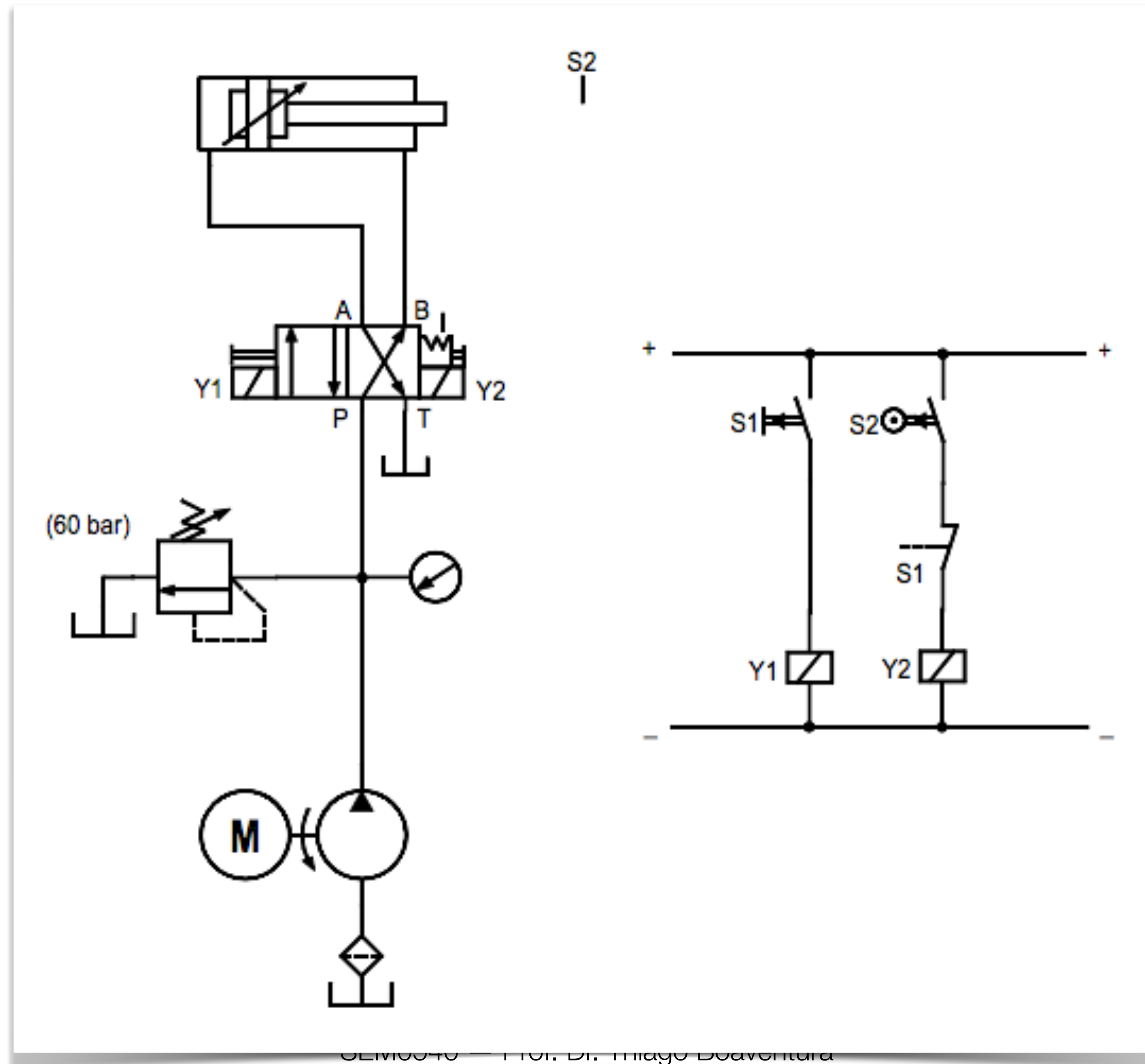
Um cilindro de ação dupla deve avançar, quando for acionado um botão de partida, e retornar automaticamente, ao atingir o final do curso de avanço.

Circuitos eletro-hidráulicos #19 - A

Circuitos hidráulicos

Modelagem

Conclusão

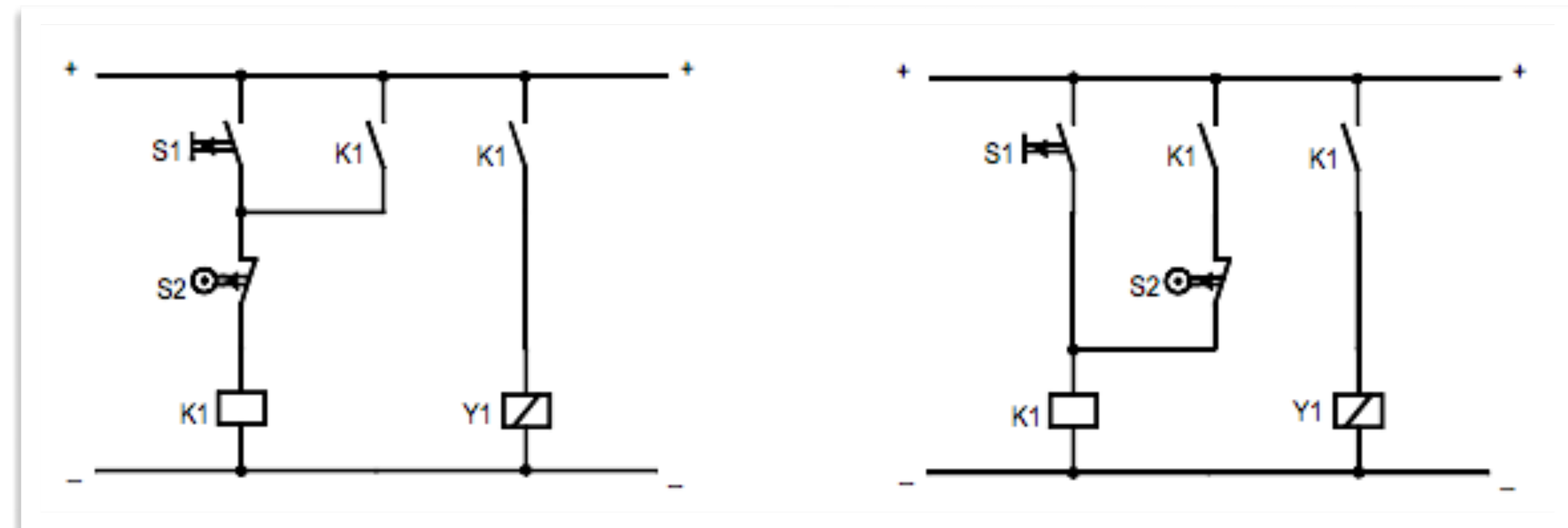
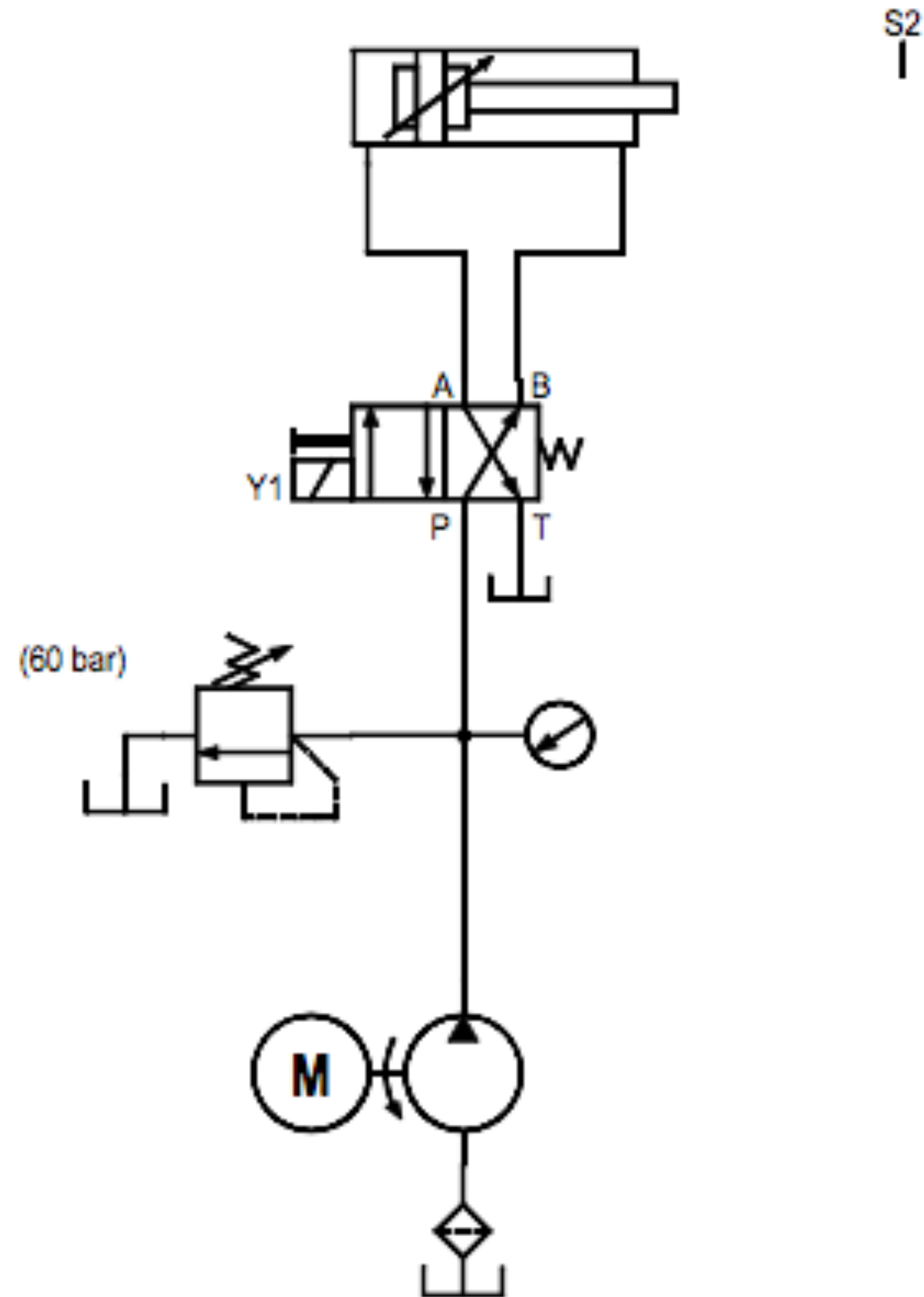


Circuitos eletro-hidráulicos #19 - B

Circuitos hidráulicos

Modelagem

Conclusão



Conteúdo

Circuitos
hidráulicos



- Modelo não-linear
- Modelo linear

Modelagem

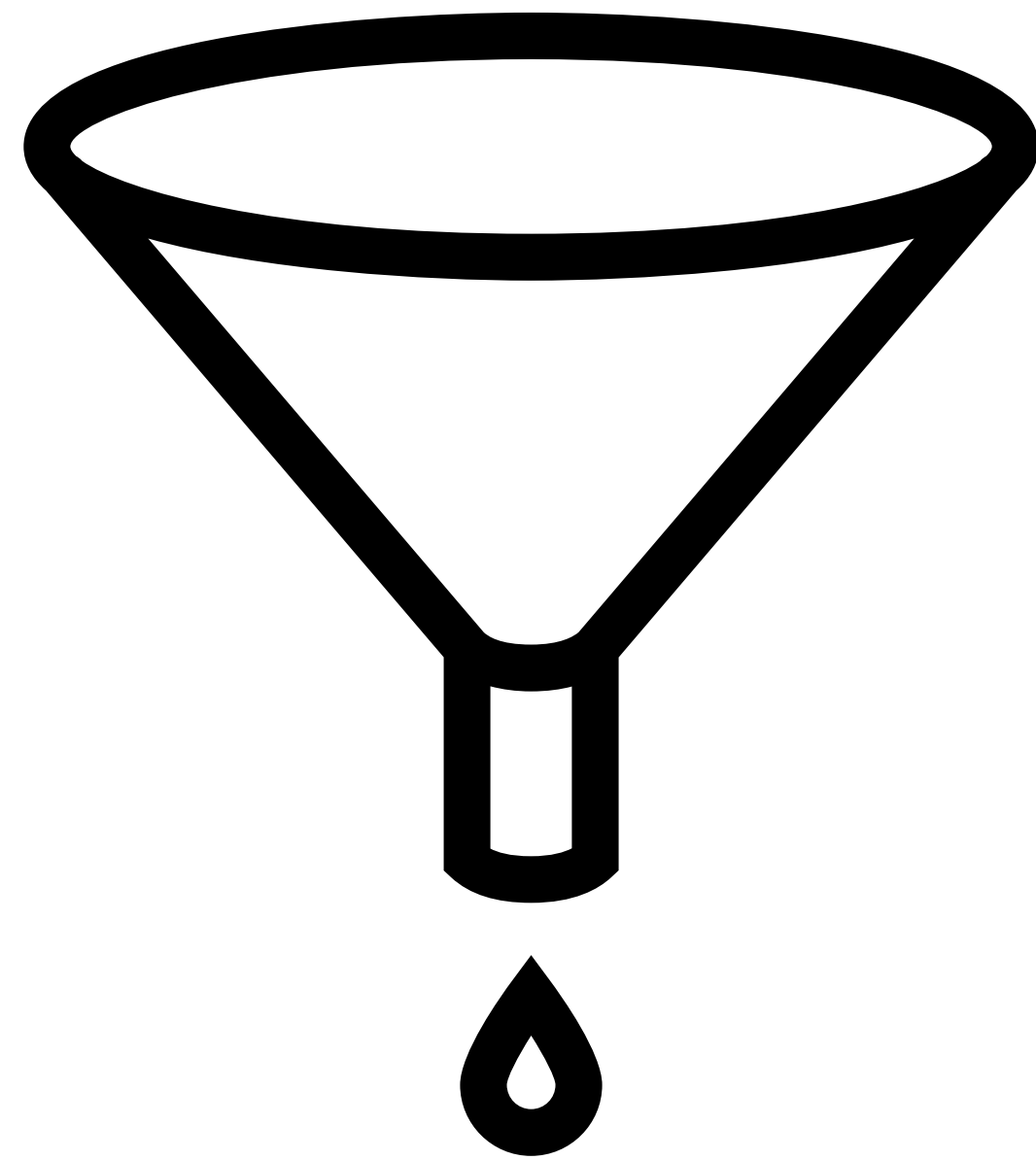
Conclusão

Fluidos

Circuitos
hidráulicos

Modelagem

Conclusão



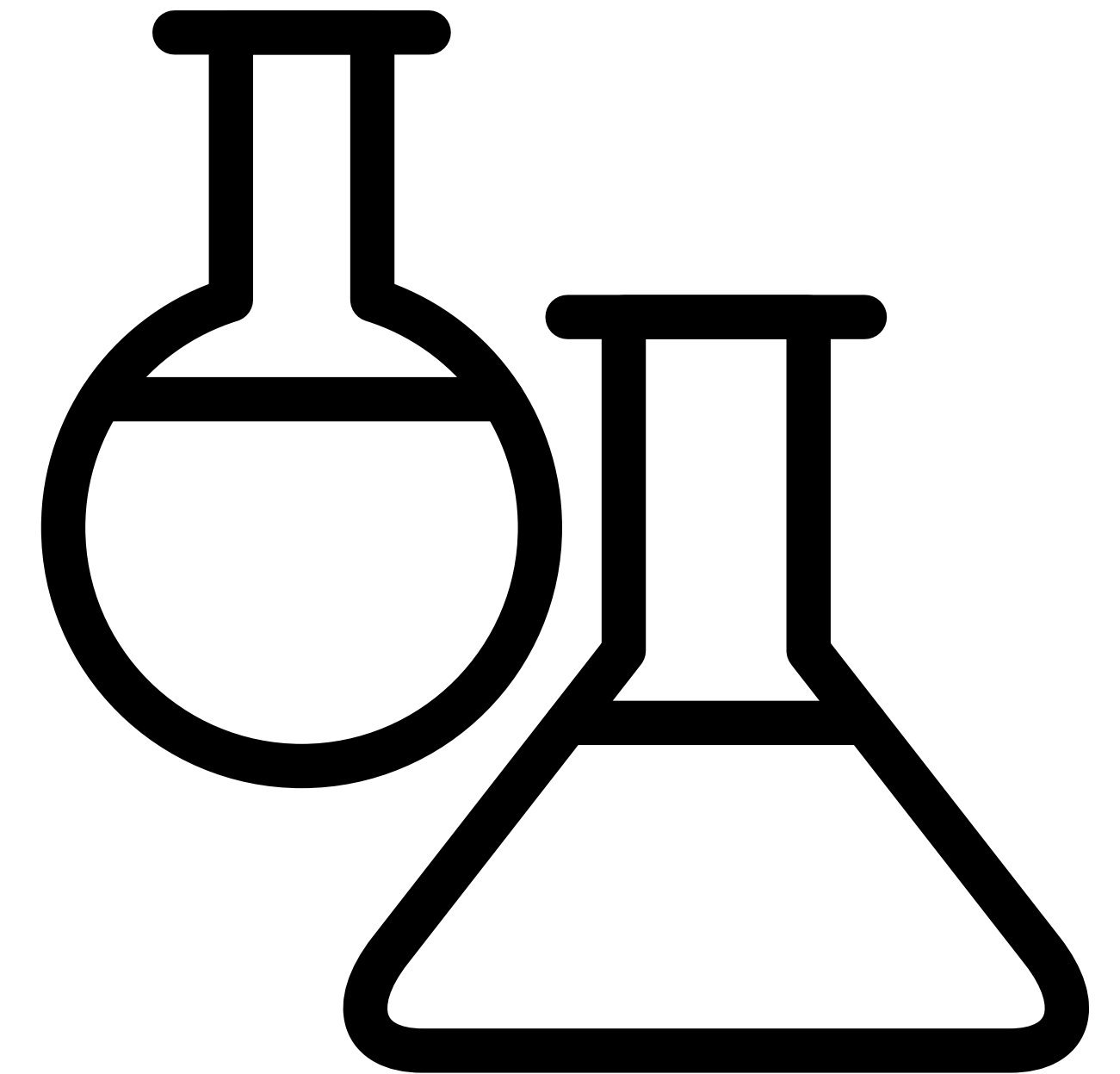
Escoam



Óleo mineral



Água

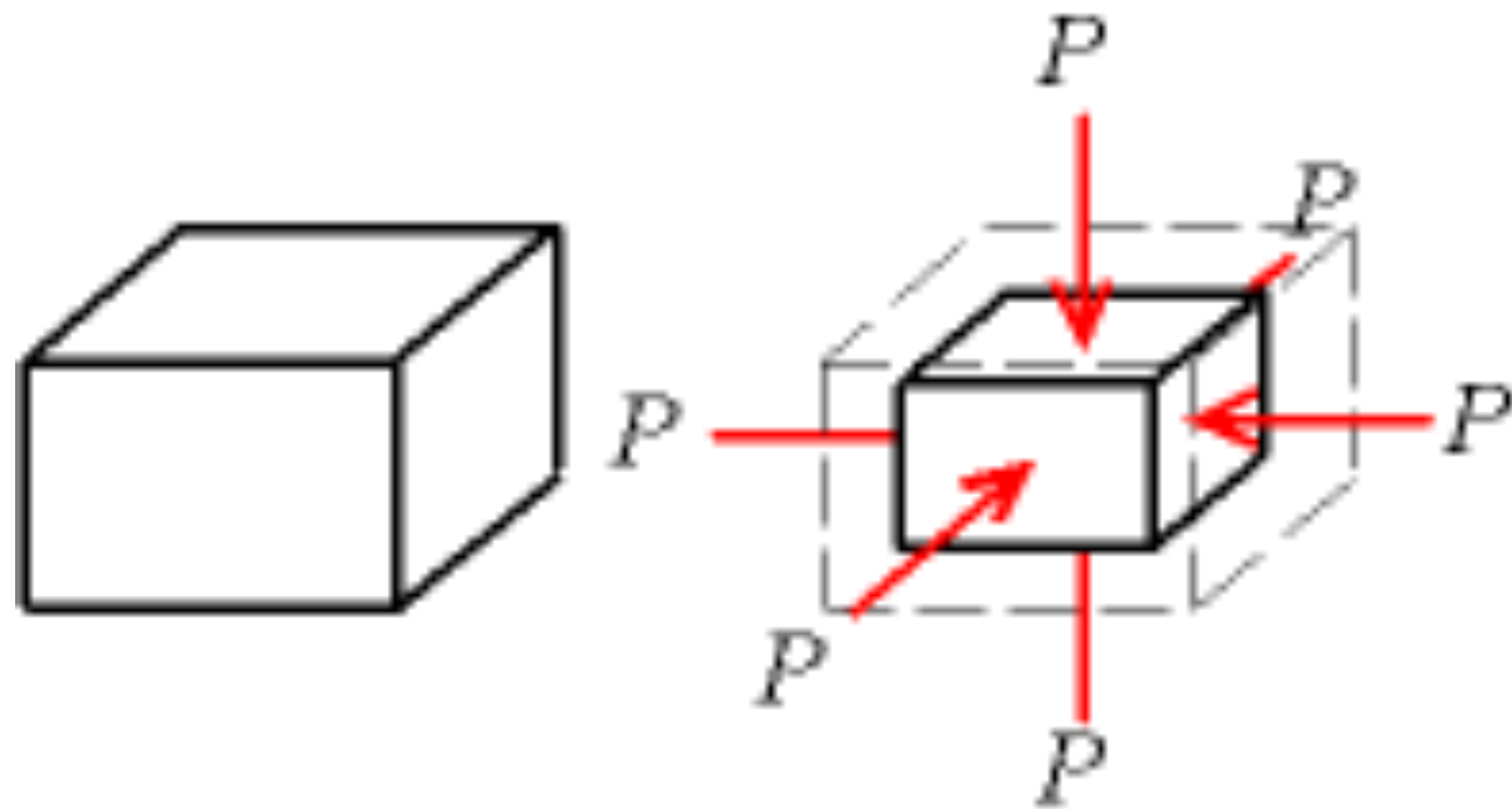


Deformam-se

Módulo volumétrico

“Resistência à compressibilidade”

Bulk modulus



$$\beta = -v_0 \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)$$

$$[Pa]$$

Módulo volumétrico

Valores típicos:

Óleo mineral: $\beta = 1500 \text{ MPa}$ (15000 *bar*)

Água: $\beta = 2200 \text{ MPa}$ (22000 *bar*)

Ar: $\beta = 0.1 \text{ MPa}$ (1 *bar*)

Módulo de elasticidade

Circuitos
hidráulicos

Modelagem

Conclusão

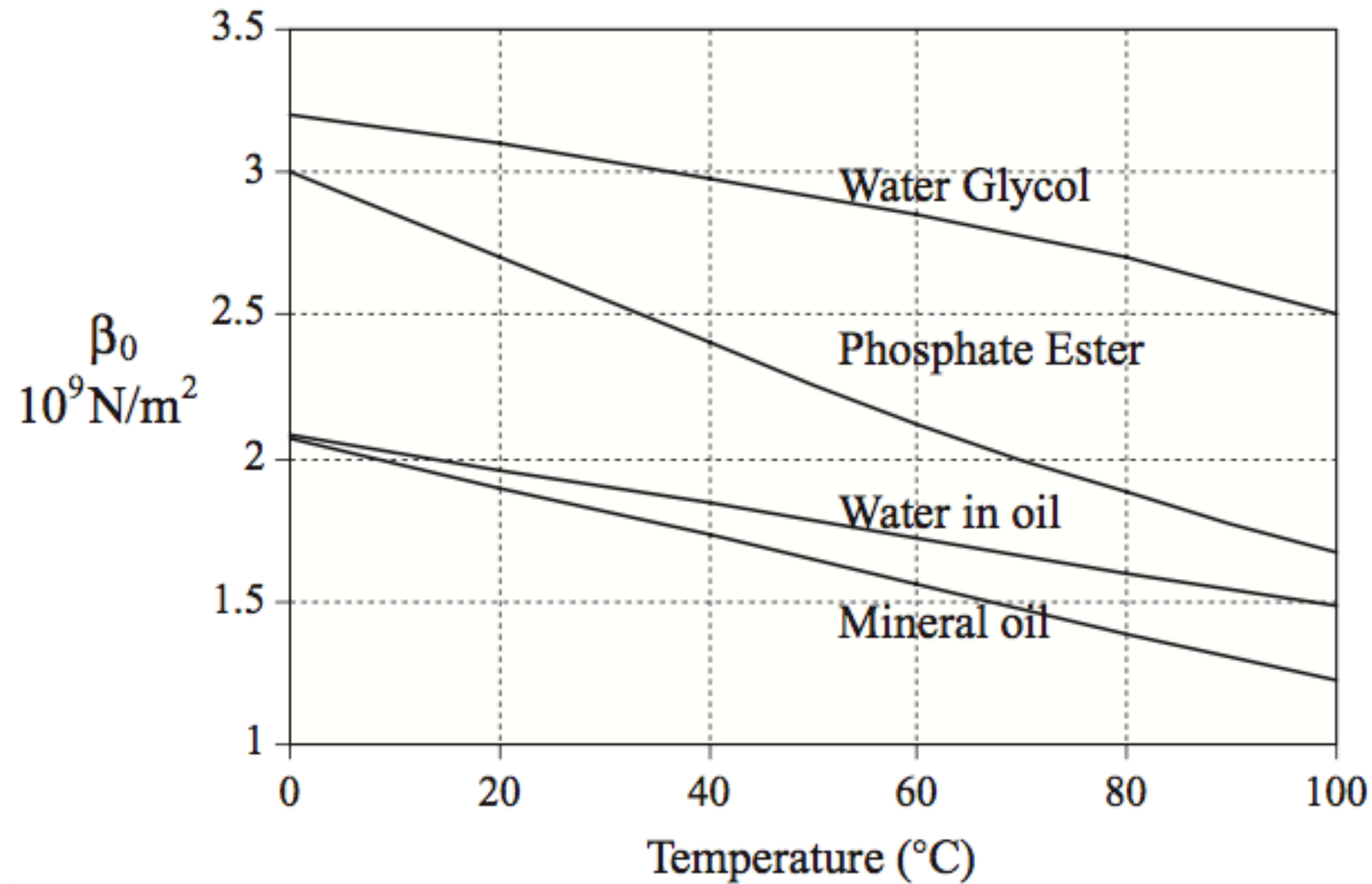
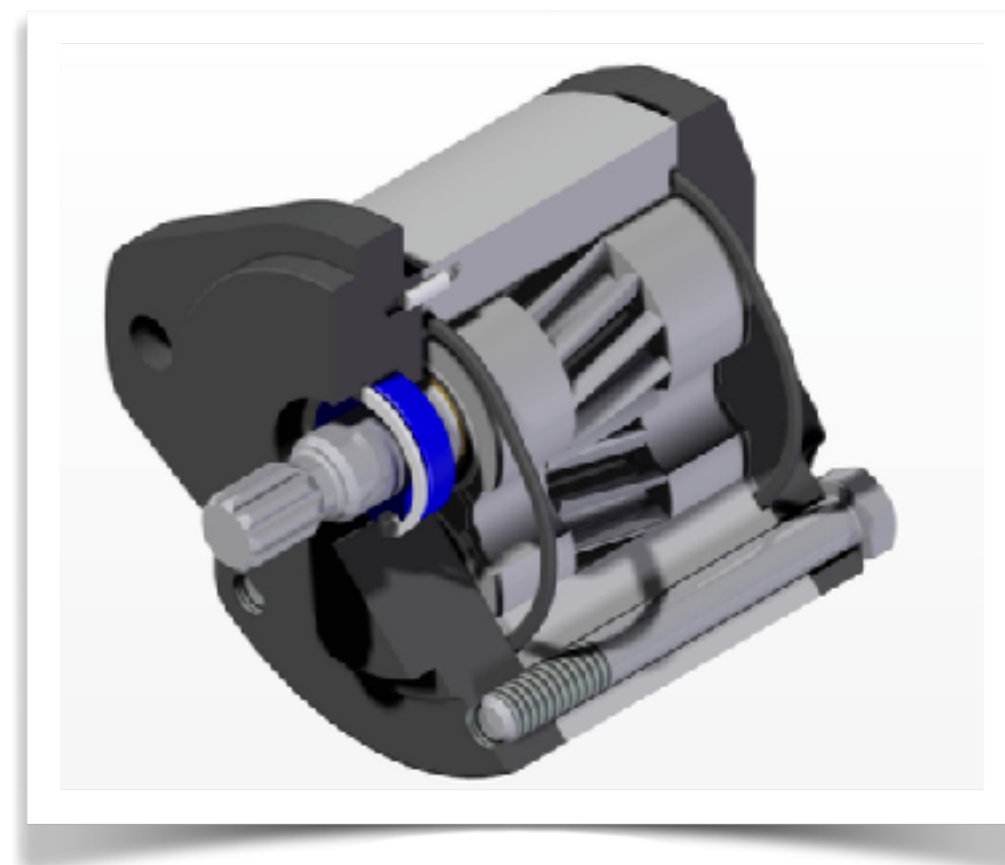


Figure 2.3. Variation of bulk modulus with temperature for different fluids.

Bombas

Circuitos
hidráulicos



Introduzem
potência
hidráulica

Modelagem

POTÊNCIA = ESFORÇO **X** FLUXO



Fluidos

= PRESSÃO **X** VAZÃO

Conclusão

$$P_{hyd} = q p$$

Bombas

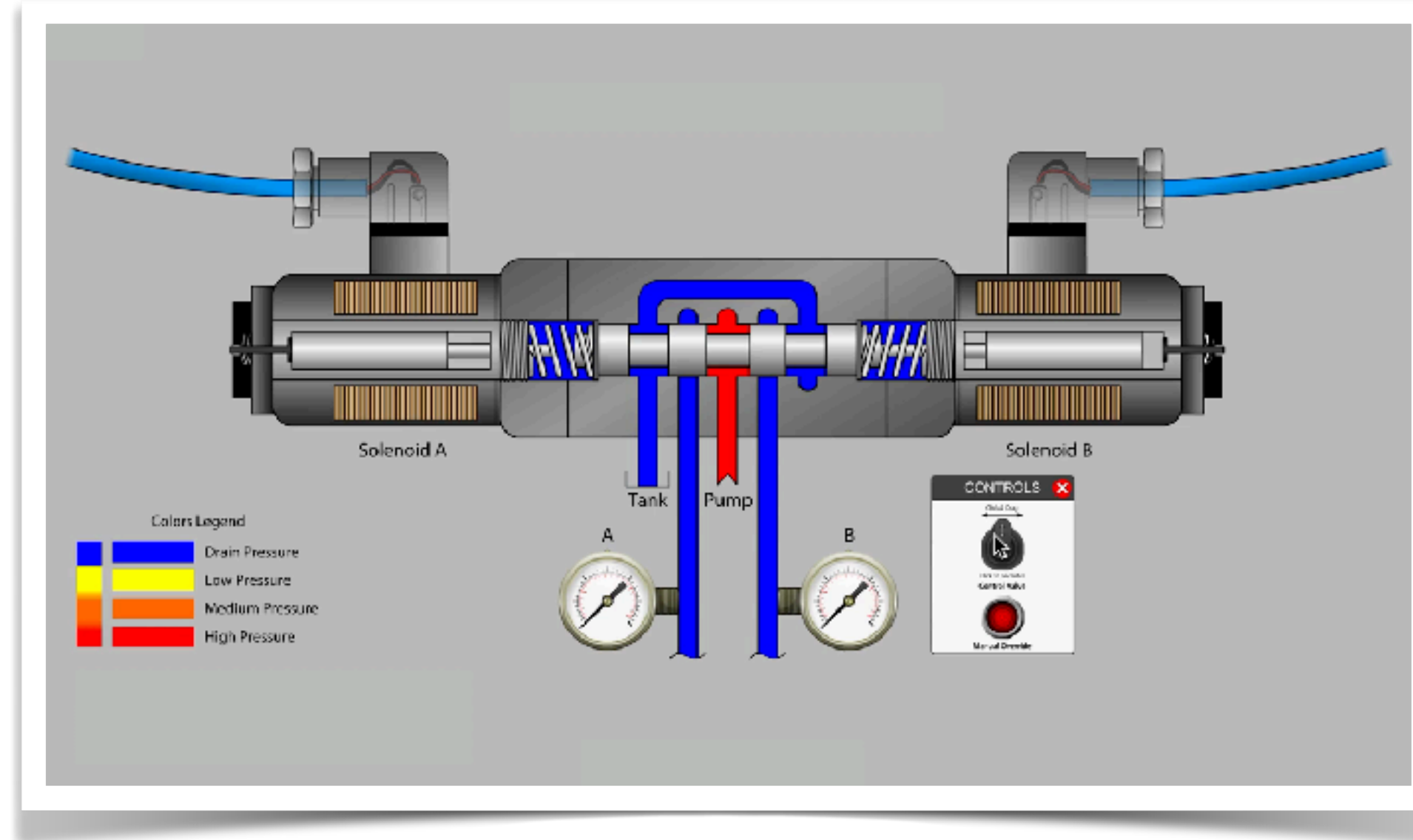
$$P_{hyd} = \frac{q p}{600}$$

P_{hyd} : hydraulic power [kW]

q : flow [l/min]

p : pressure [bar]

Carretel da válvula



$$\Delta x_v(s) = \frac{K_{spool}}{\frac{1}{\omega_v^2} s^2 + \frac{2D_v}{\omega_v} s + 1} \Delta u(s)$$

Desconsidera
dinâmica elétrica

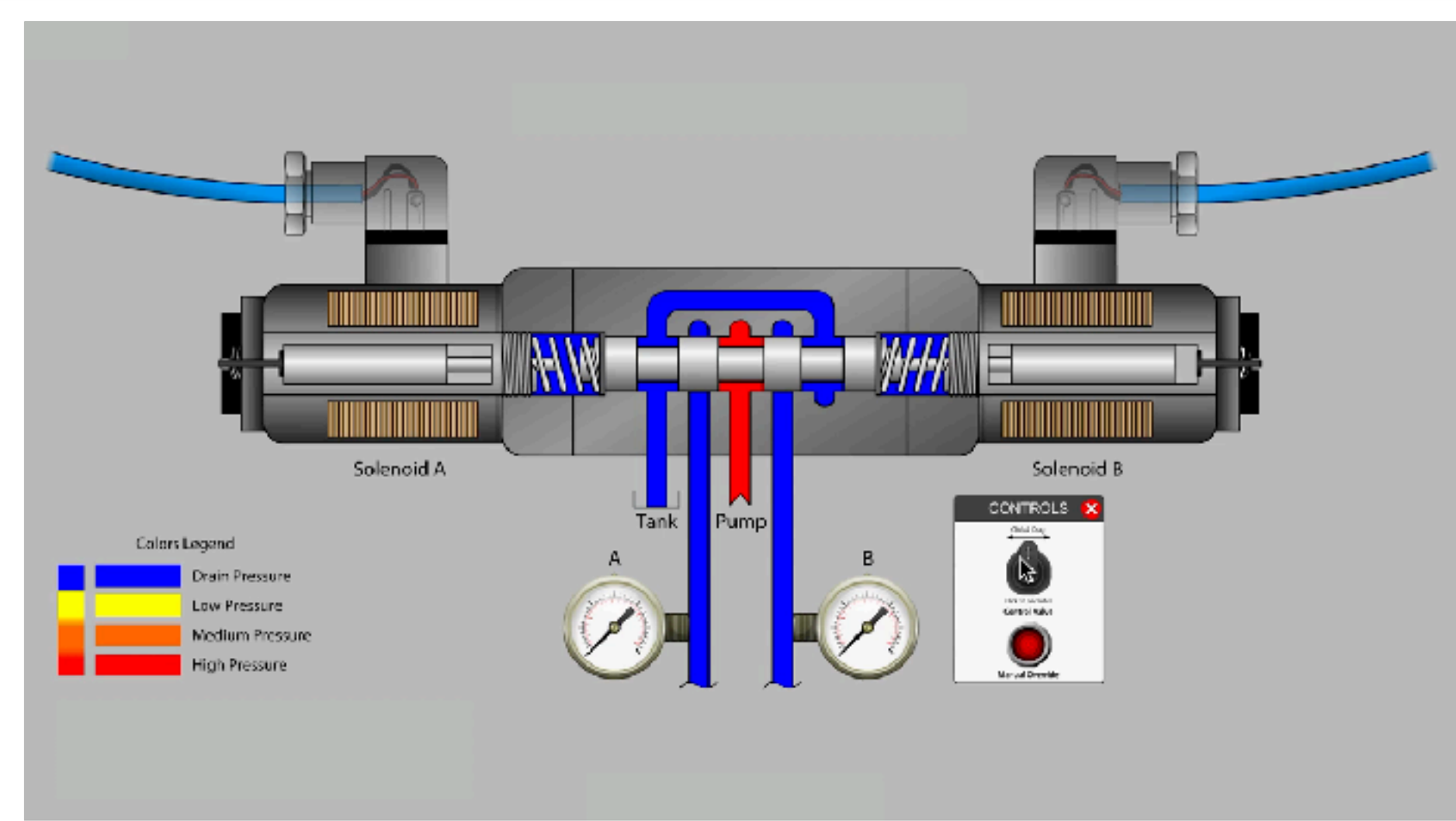
K_{spool} : steady-state valve input-to-spool-position gain [m/A]

ω_v : valve spool angular frequency [rad/s]

D_v : valve spool damping

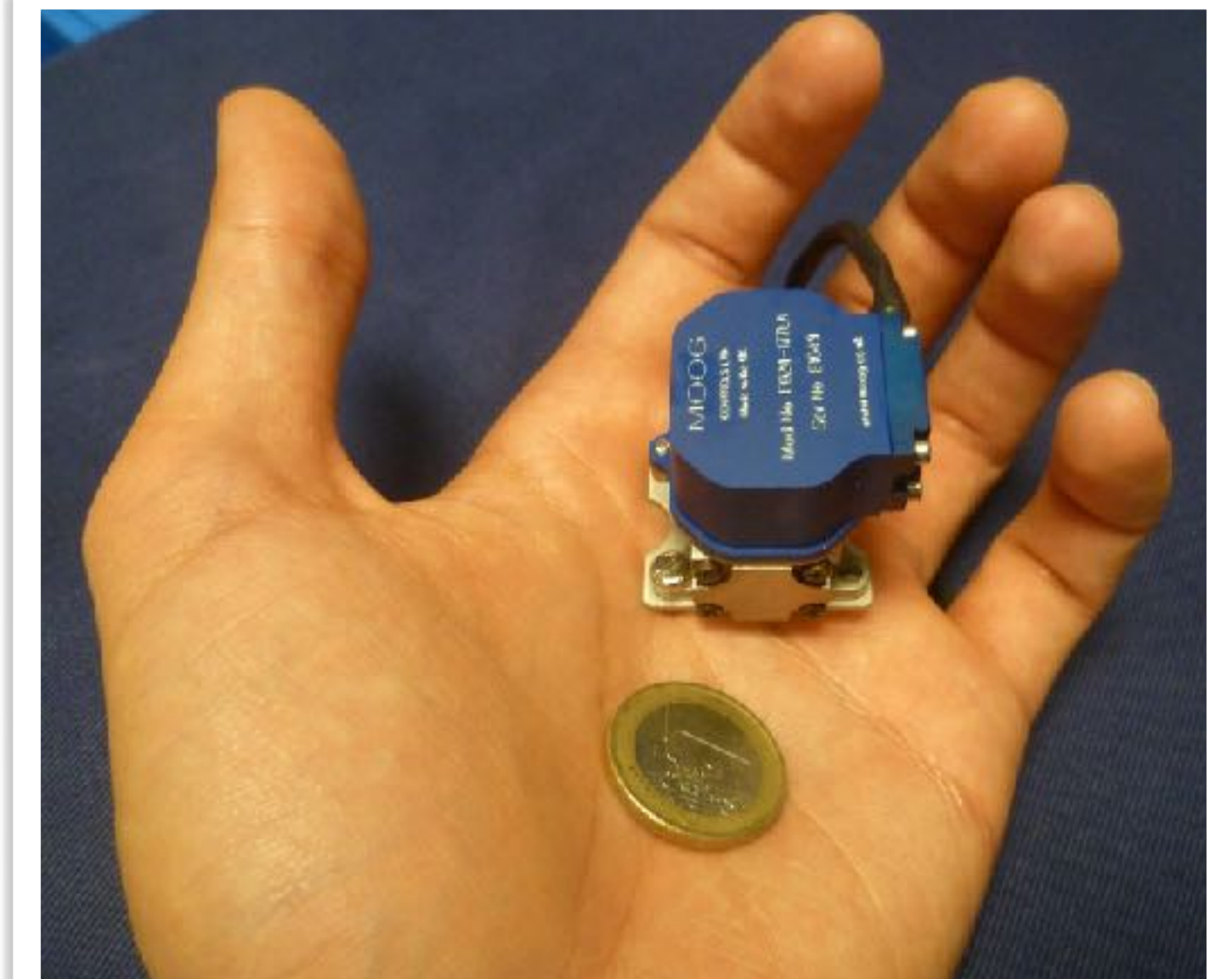
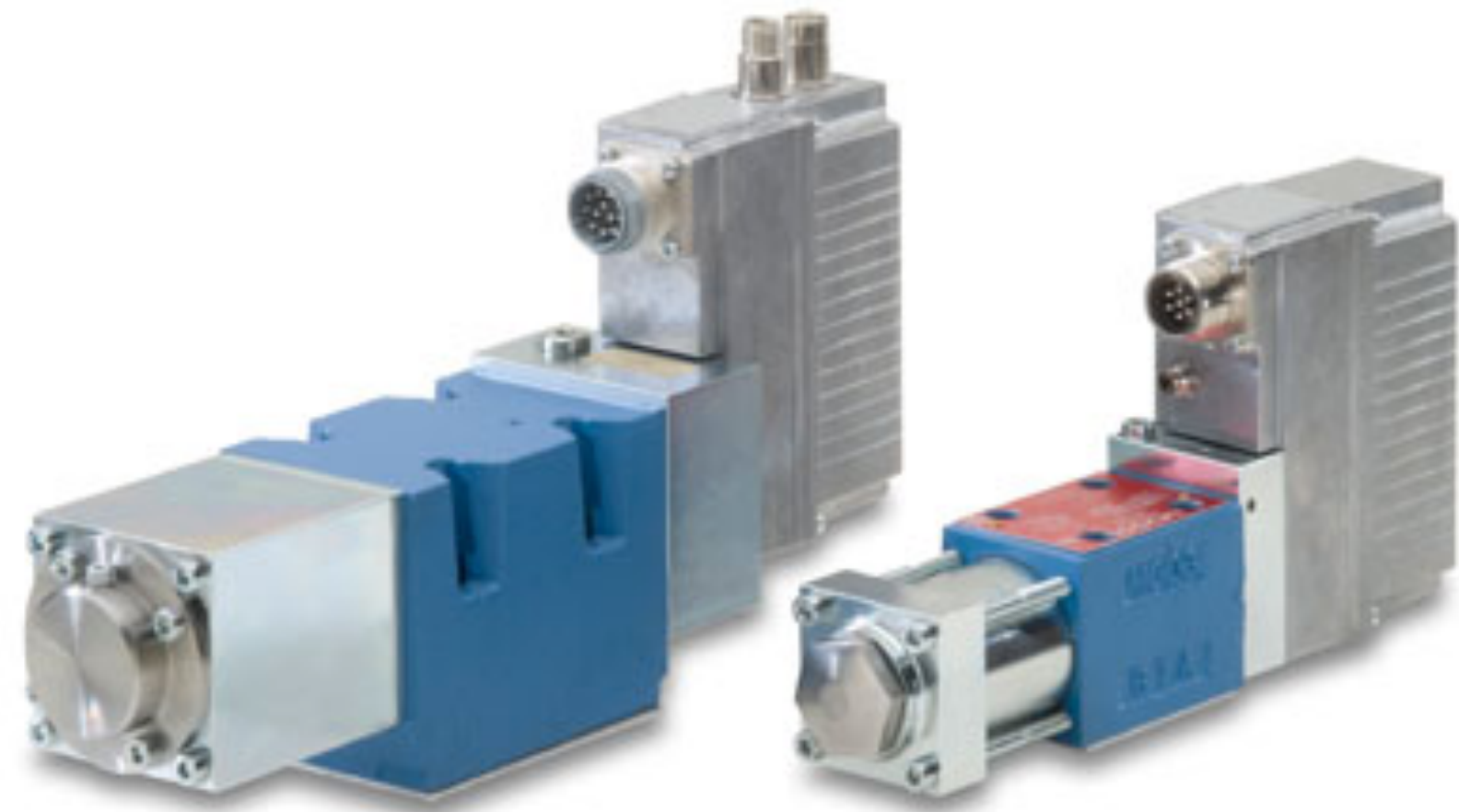
Carretel da válvula

Circuitos
hidráulicos



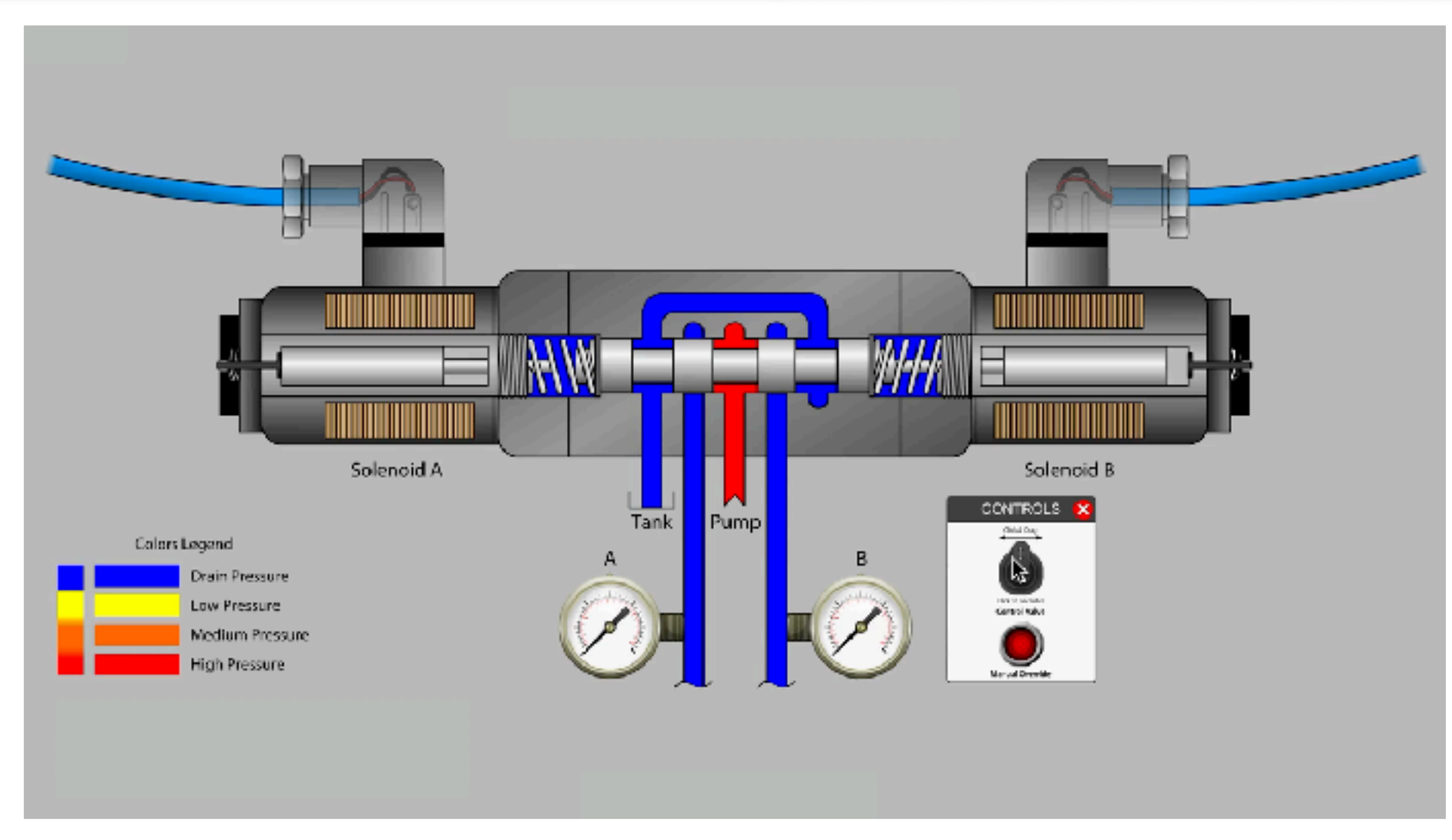
$$\Delta x_v(s) = \frac{K_{spool}}{\frac{1}{\omega_v^2} s^2 + \frac{2D_v}{\omega_v} s + 1} \Delta u(s)$$

Modelagem



Conclusão

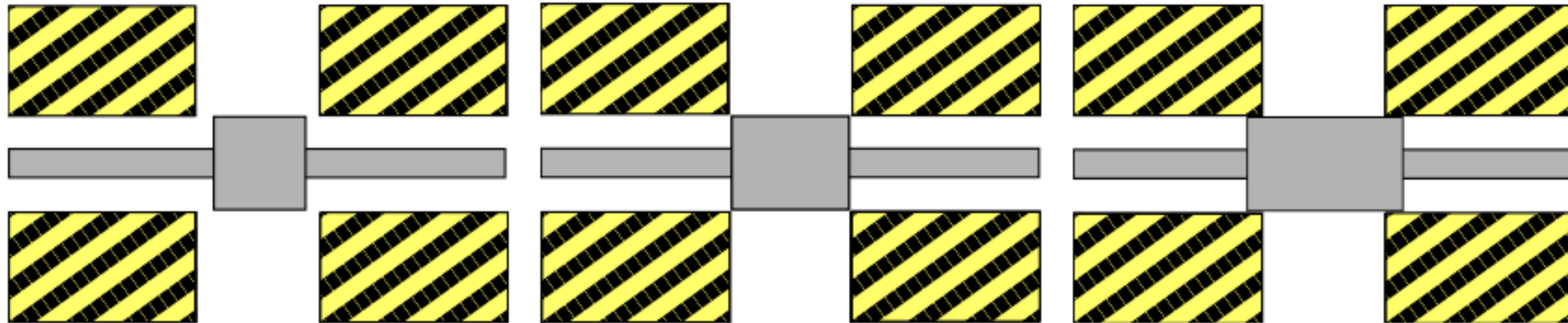
Carretel da válvula



$$\Delta x_v(s) = \frac{K_{spool}}{\frac{1}{\omega_v^2} s^2 + \frac{2D_v}{\omega_v} s + 1} \Delta u(s)$$

$$\Delta u_v(s) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_v^2} s^2 + \frac{2D_v}{\omega_v} s + 1} \Delta u(s) = \frac{1}{K_{spool}} \Delta x_v(s)$$

Carretel da válvula



(a) Under-lapped spool

(b) Zero-lapped spool

(c) Over-lapped spool

- **Tipo de centro (ou sobreposição ou recobrimento):** Relaciona a diferença entre o comprimento do ressalto (l_r) e o comprimento do pórtico (l_p):
 - Centro supercrítico (sobreposição positiva): $l_r > l_p$
 - Centro crítico (sobreposição nula): $l_r = l_p$
 - Centro subcrítico (sobreposição negativa): $l_r < l_p$

Válvula - Vazão

$$q = a(u_v) v$$

$$q = C_d a(u_v) \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

where,

C_d : discharge coefficient ($C_d \approx 0.6$ is often assumed [Merritt, 1967])

ρ : oil density (for HyQ ISO VG46 oil, $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$)

Válvula - Vazão

$$q = C_d a(u_v) \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}$$

$$q = K_v u_v \sqrt{\Delta p}$$

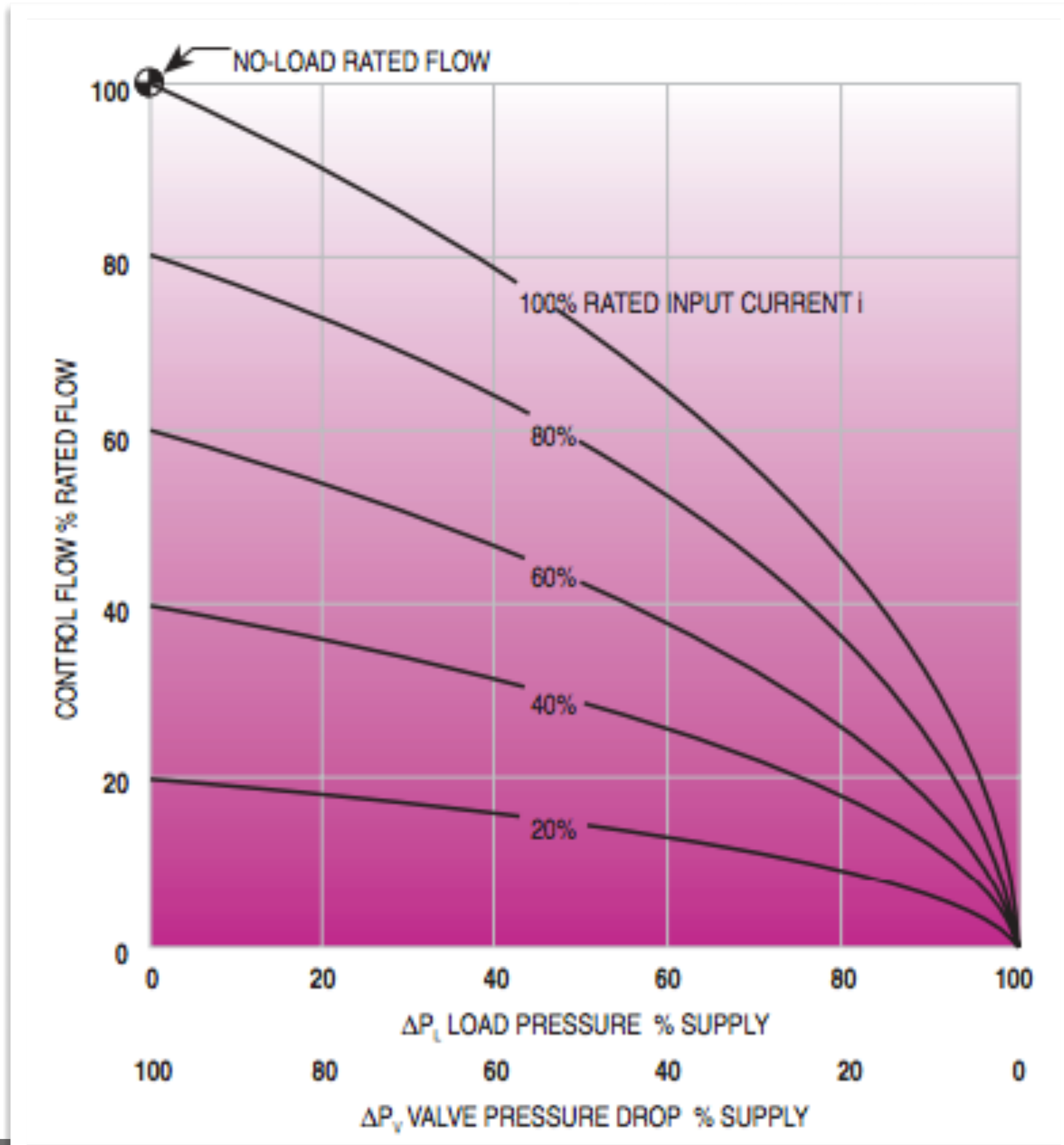
K_v : valve gain

Válvula - Vazão

Circuitos
hidráulicos

Modelagem

Conclusão



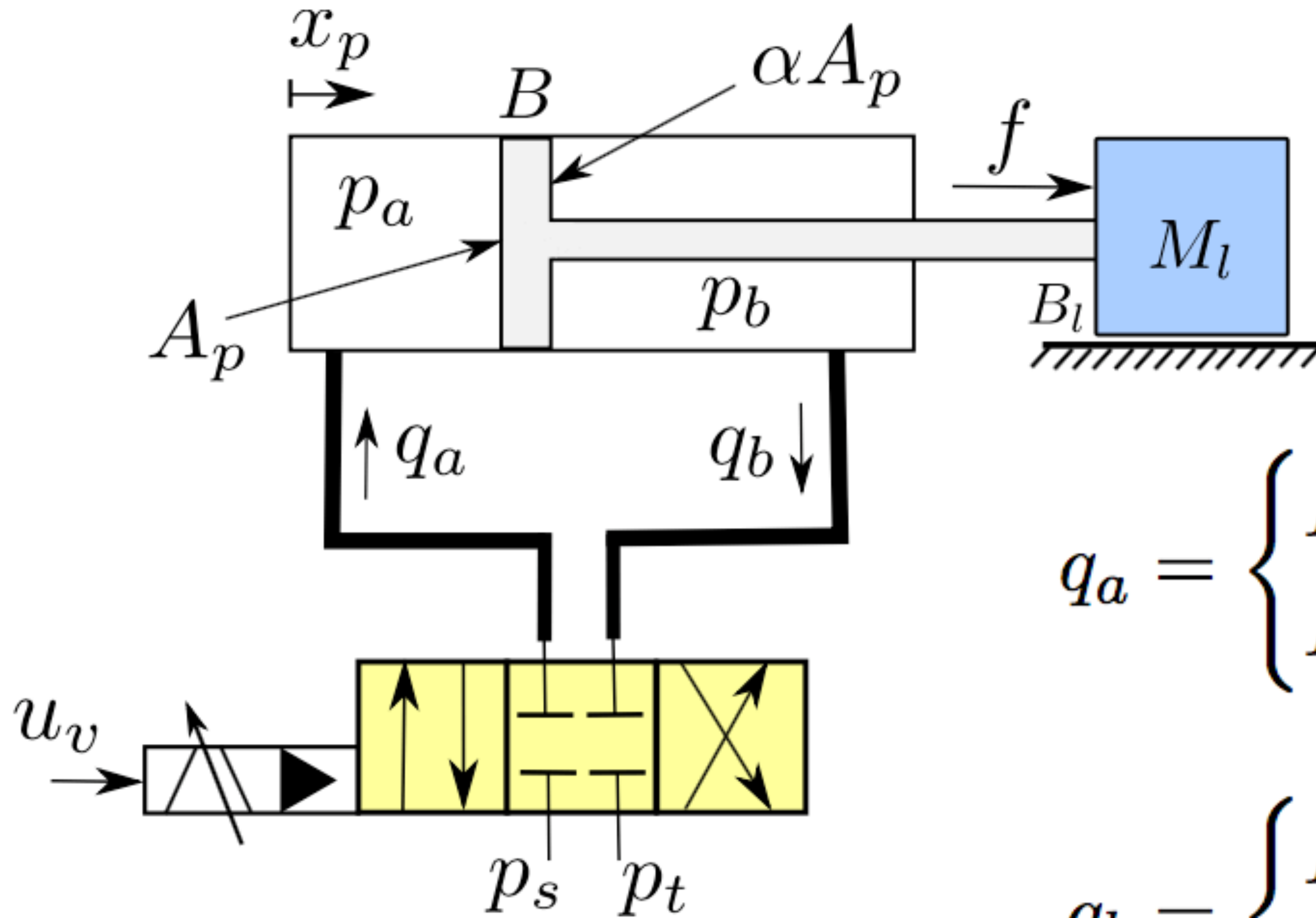
$$q = K_v u_v \sqrt{\Delta p}$$

Vazão no atuador

Circuitos hidráulicos

Modelagem

Conclusão



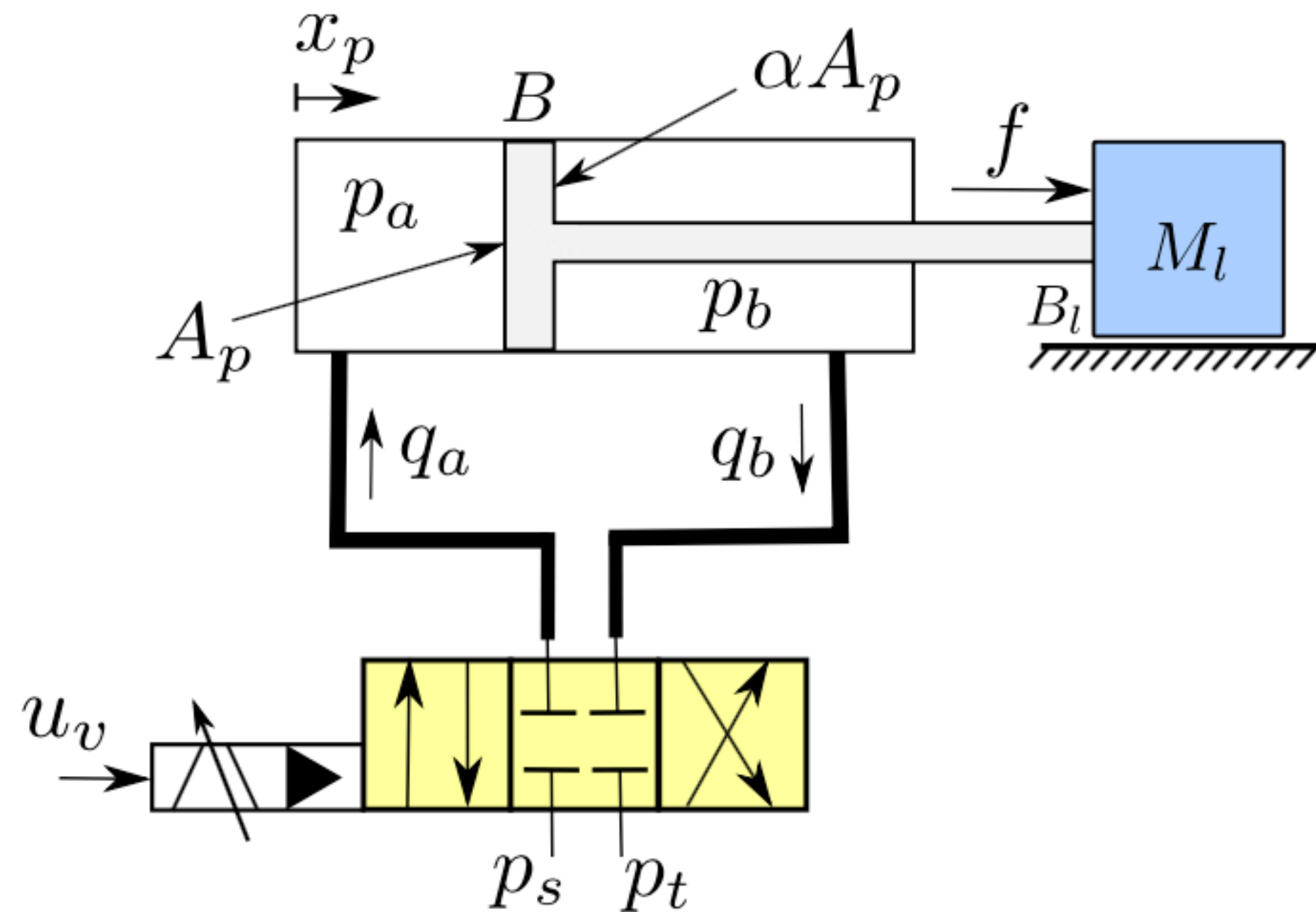
$$q_a = \begin{cases} K_v u_v \sqrt{p_s - p_a}, & u_v > 0 \\ K_v u_v \sqrt{p_a - p_t}, & u_v < 0 \end{cases}$$

$$q_b = \begin{cases} K_v u_v \sqrt{p_b - p_t}, & u_v > 0 \\ K_v u_v \sqrt{p_s - p_b}, & u_v < 0 \end{cases}$$

Pressão nas câmaras do atuador

Princípio de conservação da massa

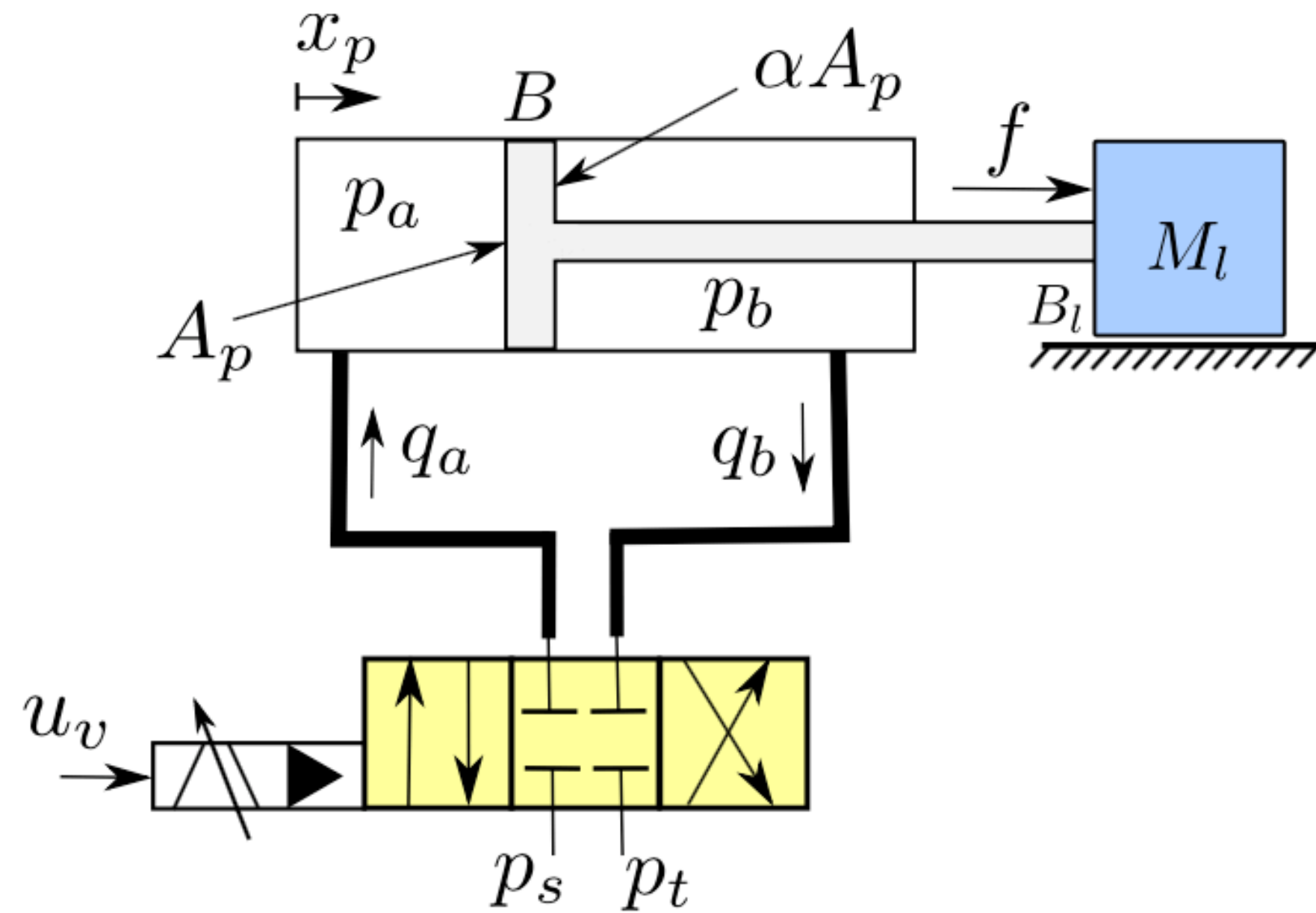
(Eq. da continuidade)



$$\dot{p}_a = \frac{\beta_e}{v_a} (q_a - A_p \dot{x}_p)$$

$$\dot{p}_b = \frac{\beta_e}{v_b} (-q_b + \alpha A_p \dot{x}_p)$$

Pressão nas câmaras do atuador



$$\dot{p}_a = \frac{\beta_e}{v_a} (q_a - A_p \dot{x}_p)$$

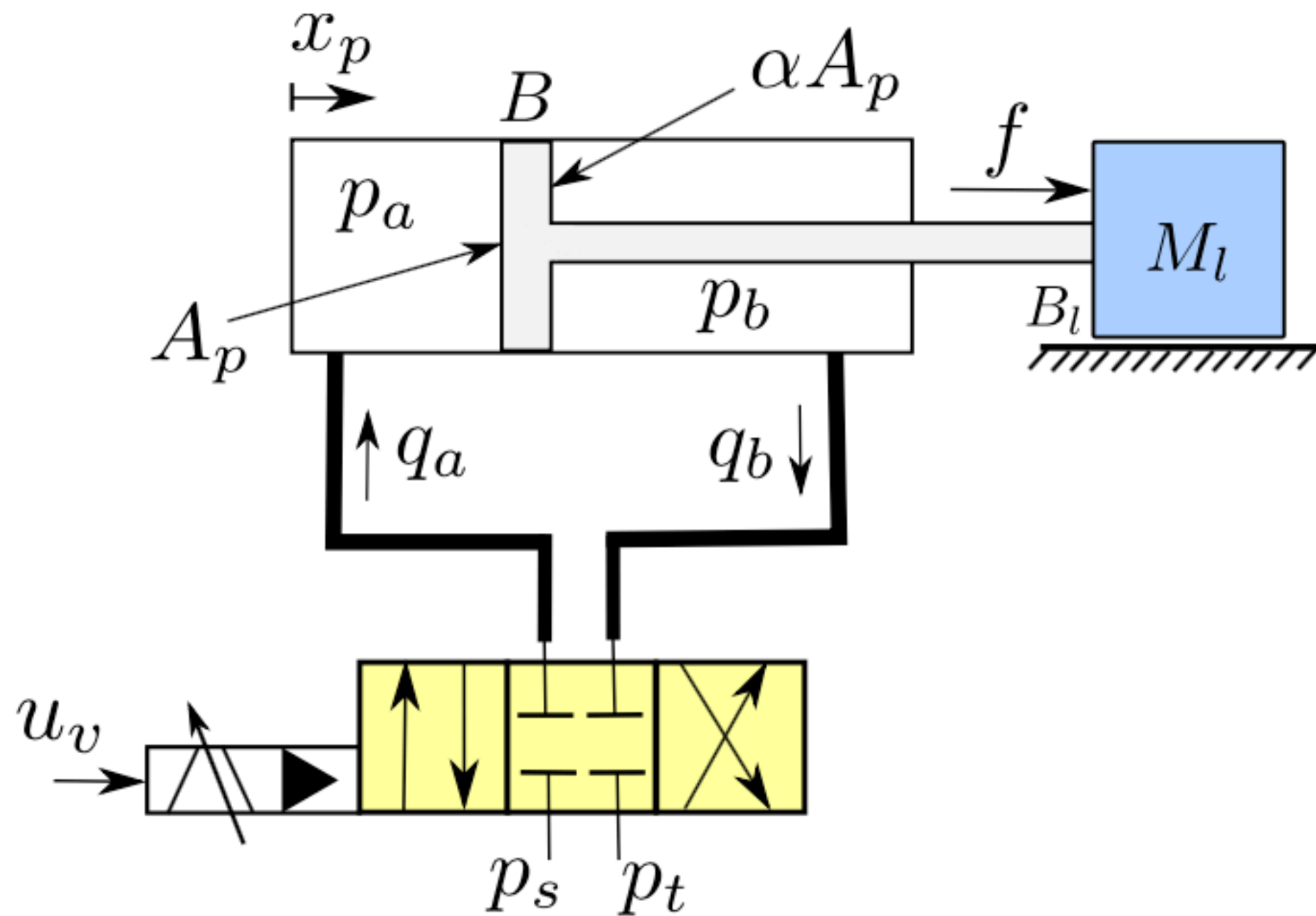
$$\dot{p}_b = \frac{\beta_e}{v_b} (-q_b + \alpha A_p \dot{x}_p)$$

$$v_a = V_{pl} + A_p x_p$$

$$v_b = V_{pl} + (L_c - x_p) \alpha A_p$$

Força hidráulica

$$f_h = A_p p_a - \alpha A_p p_b = A_p (p_a - \alpha p_b)$$



Pressão de carga

$$p_l := p_a - \alpha p_b$$

$$f_h = A_p p_l$$

Força hidráulica

$$f_h = A_p p_a - \alpha A_p p_b = A_p (p_a - \alpha p_b)$$

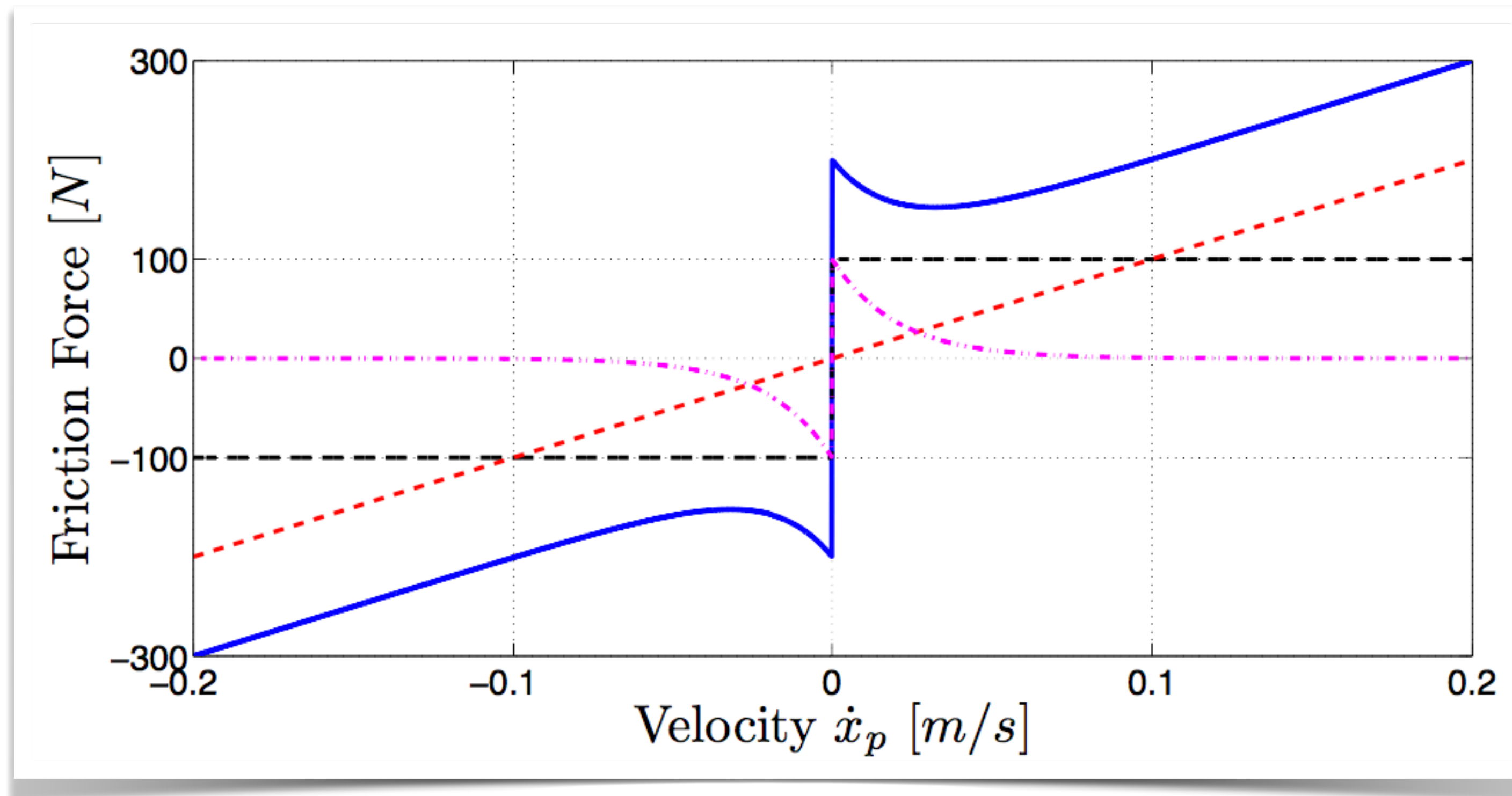
$$\dot{p}_a = \frac{\beta_e}{v_a} (q_a - A_p \dot{x}_p)$$

$$\dot{p}_b = \frac{\beta_e}{v_b} (-q_b + \alpha A_p \dot{x}_p)$$

$$\dot{f}_h = \frac{A_p \beta_e}{v_a} (q_a - A_p \dot{x}_p) - \frac{\alpha A_p \beta_e}{v_b} (-q_b + \alpha A_p \dot{x}_p)$$

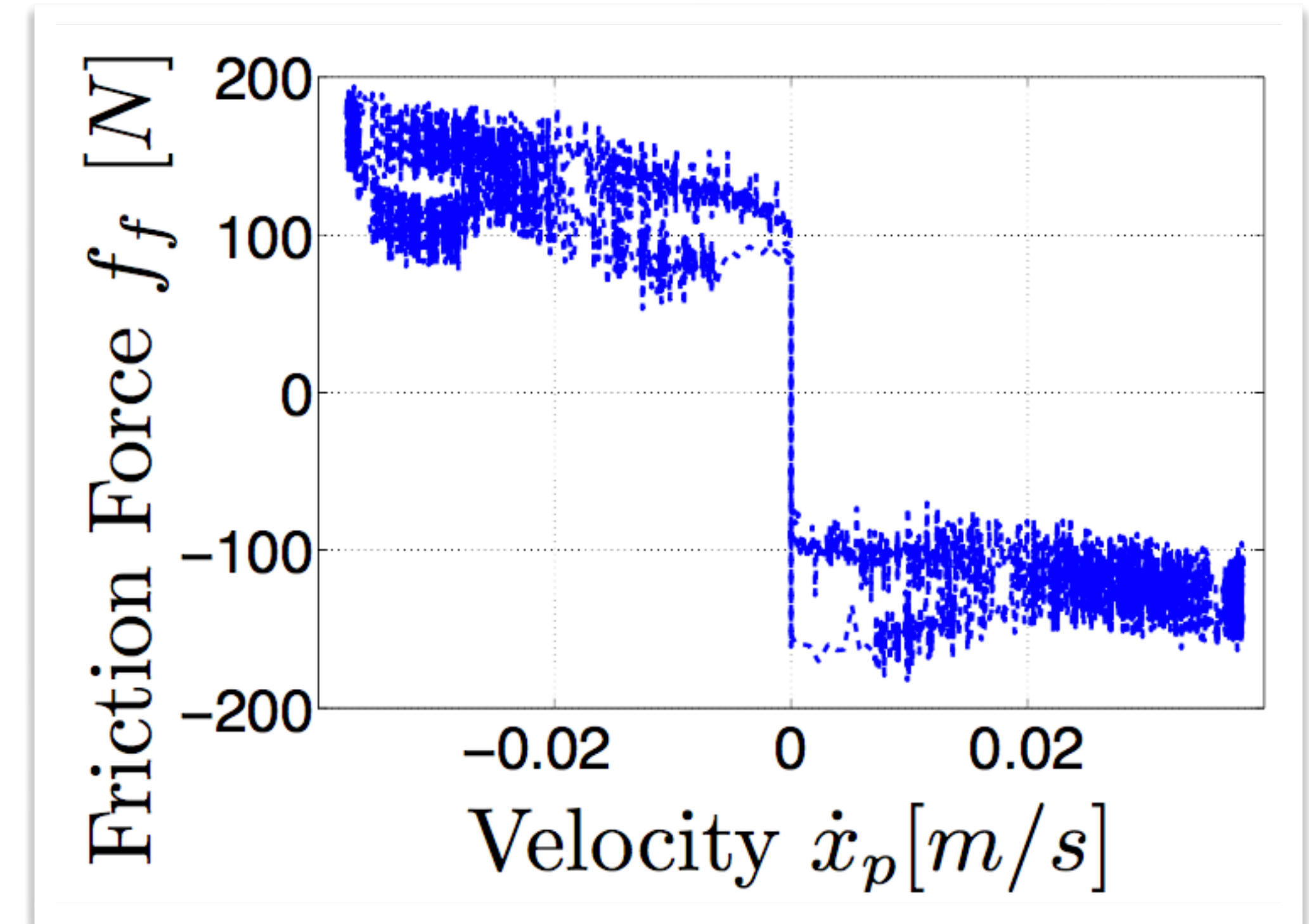
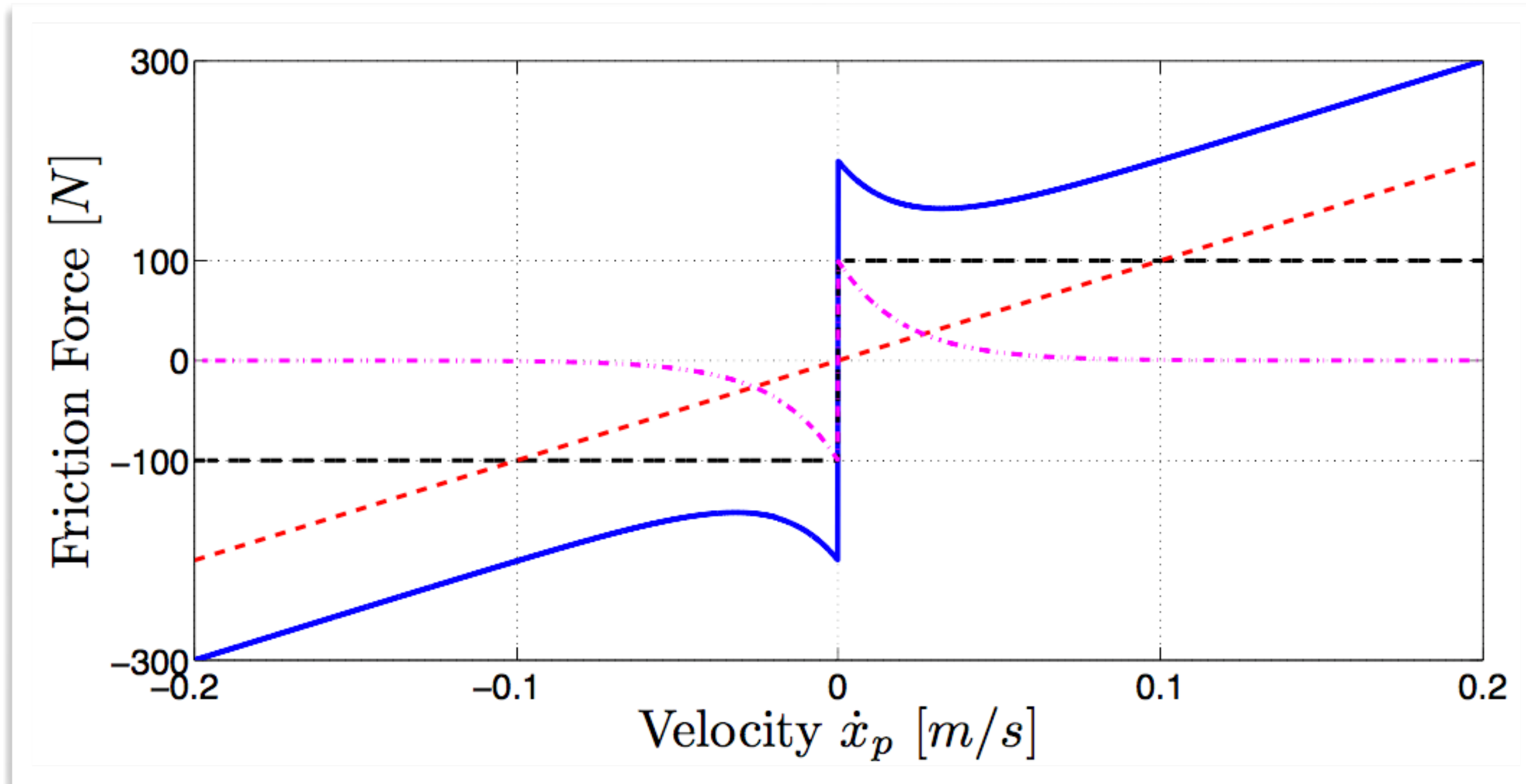
Força de atrito

$$f_f = B\dot{x}_p + \text{sign}(\dot{x}_p) \left(F_{c0} + F_{s0} e^{-\frac{|\dot{x}_p|}{C_s}} \right)$$



Curva de Stribeck

Força de atrito

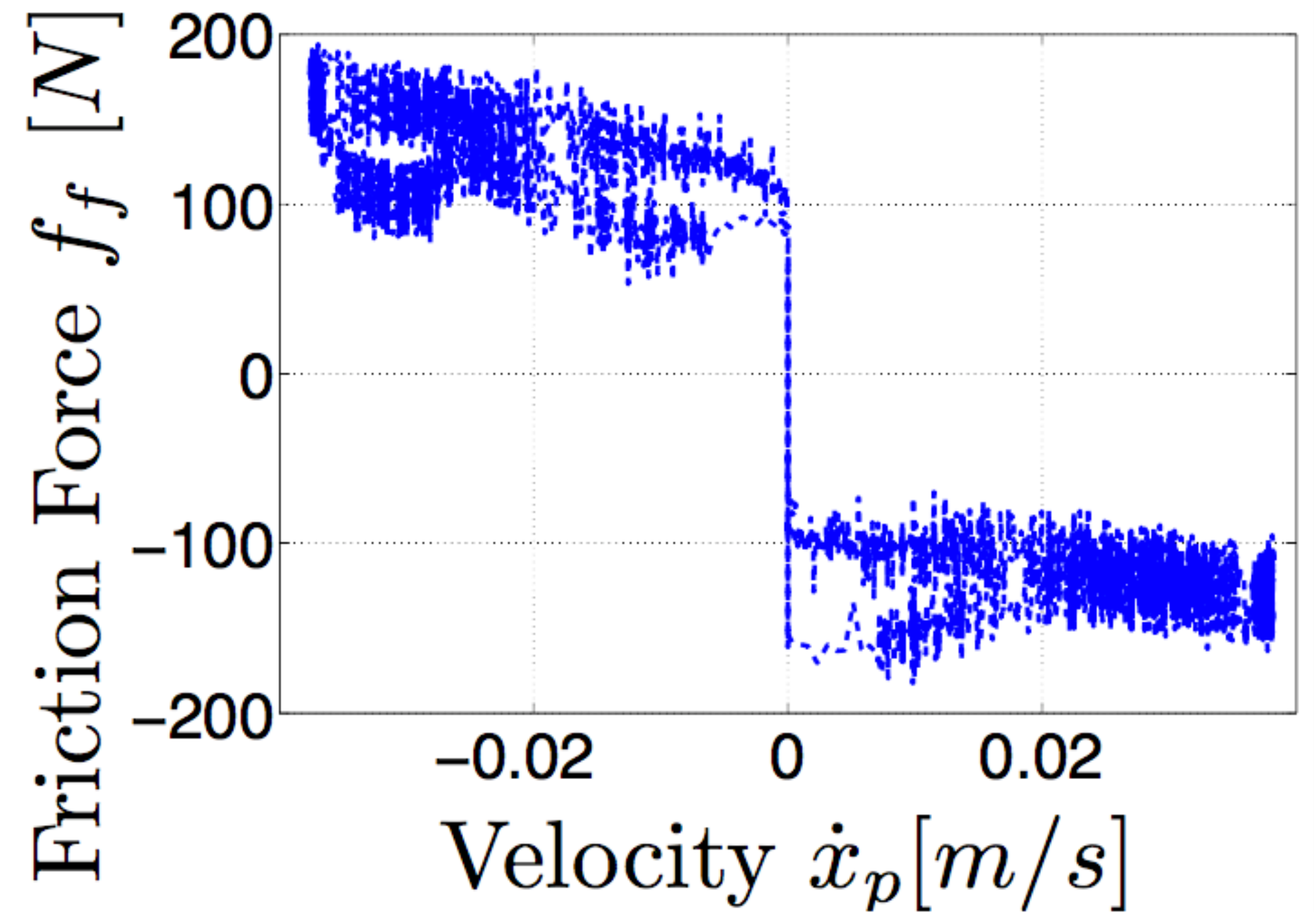
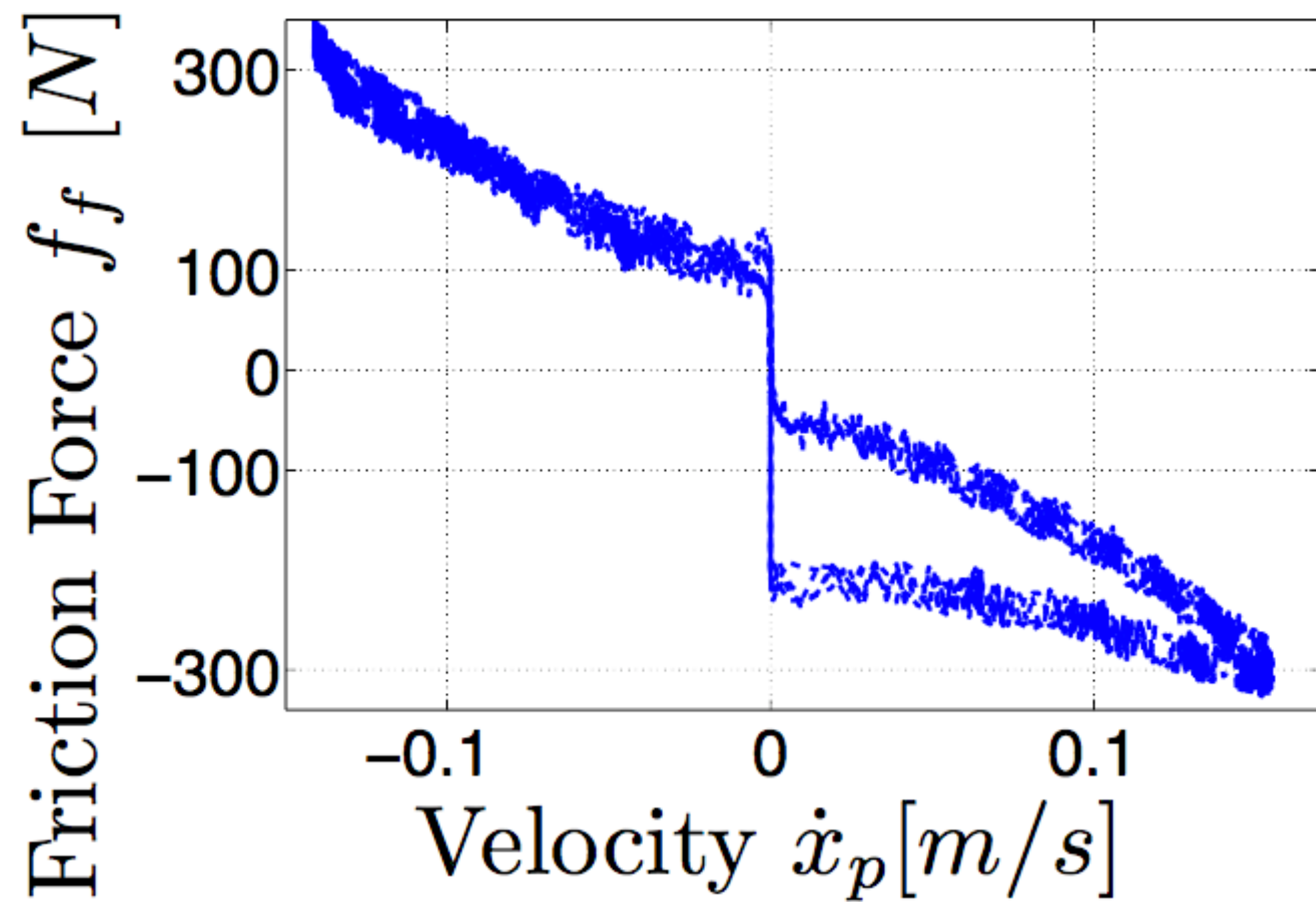


Força de atrito

Circuitos
hidráulicos

Modelagem

Conclusão



Força de carga

$$\dot{f}_h = \frac{A_p \beta_e}{v_a} (q_a - A_p \dot{x}_p) - \frac{\alpha A_p \beta_e}{v_b} (-q_b + \alpha A_p \dot{x}_p)$$

$$q_a = \begin{cases} K_v u_v \sqrt{p_s - p_a}, & u_v > 0 \\ K_v u_v \sqrt{p_a - p_t}, & u_v < 0 \end{cases}$$

$$q_b = \begin{cases} K_v u_v \sqrt{p_b - p_t}, & u_v > 0 \\ K_v u_v \sqrt{p_s - p_b}, & u_v < 0 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \dot{f} &= \dot{f}_h - B \ddot{x}_p = \\ &= \begin{cases} -\beta_e A_p^2 \left(\frac{1}{v_a} + \frac{\alpha^2}{v_b} \right) \dot{x}_p - B \ddot{x}_p + \beta_e A_p K_v \left(\frac{\sqrt{p_s - p_a}}{v_a} + \frac{\alpha \sqrt{p_b - p_t}}{v_b} \right) u_v, & u_v > 0. \\ -\beta_e A_p^2 \left(\frac{1}{v_a} + \frac{\alpha^2}{v_b} \right) \dot{x}_p - B \ddot{x}_p + \beta_e A_p K_v \left(\frac{\sqrt{p_a - p_t}}{v_a} + \frac{\alpha \sqrt{p_s - p_b}}{v_b} \right) u_v, & u_v < 0. \end{cases} \end{aligned}$$

Conteúdo

Circuitos
hidráulicos



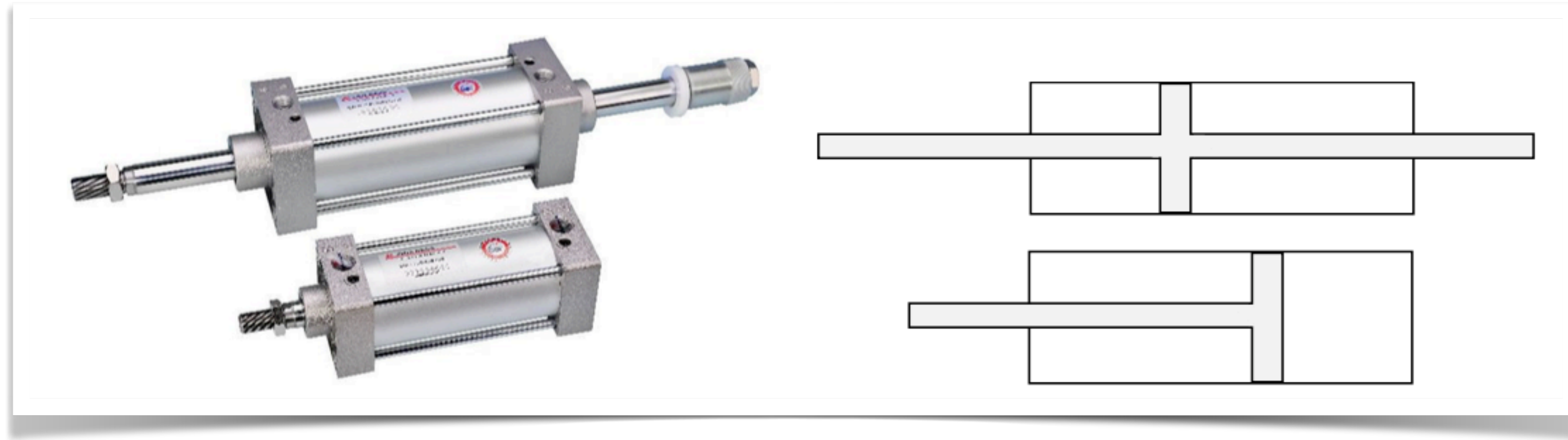
- Modelo não-linear
- **Modelo linear**

Modelagem

Conclusão

Ponto de operação

$$P_{\ominus} = (p_{a\ominus}, p_{b\ominus}, u_{v\ominus})$$



$$P_{\ominus} = \left(\frac{p_s}{2}, \frac{p_s}{2}, 0 \right)$$

$$P_{\ominus} = \left(\frac{\alpha p_s}{1+\alpha}, \frac{p_s}{1+\alpha}, 0 \right)$$

Vazão linearizada

$$q_a = \begin{cases} K_v u_v \sqrt{p_s - p_a}, & u_v > 0 \\ K_v u_v \sqrt{p_a - p_t}, & u_v < 0 \end{cases}$$
$$q_b = \begin{cases} K_v u_v \sqrt{p_b - p_t}, & u_v > 0 \\ K_v u_v \sqrt{p_s - p_b}, & u_v < 0 \end{cases}$$

$$\Delta q_a = K_{qa} \Delta u_v - K_{ca} \Delta p_a$$

$$\Delta q_b = K_{qb} \Delta u_v - K_{cb} \Delta p_b$$

Expandindo usando
Série de Taylor

Coeficientes da válvula

$$q_a = \begin{cases} K_v u_v \sqrt{p_s - p_a}, & u_v > 0 \\ K_v u_v \sqrt{p_a - p_t}, & u_v < 0 \end{cases}$$

$$q_b = \begin{cases} K_v u_v \sqrt{p_b - p_t}, & u_v > 0 \\ K_v u_v \sqrt{p_s - p_b}, & u_v < 0 \end{cases}$$

$$\Delta q_a = K_{qa} \Delta u_v - K_{ca} \Delta p_a$$

$$\Delta q_b = K_{qb} \Delta u_v - K_{cb} \Delta p_b$$

$$K_{qa} = \left. \frac{\partial q_a}{\partial u_v} \right|_{P_0} = \begin{cases} K_v \sqrt{p_s - p_{a0}}, & u_v > 0. \\ K_v \sqrt{p_{a0} - p_t}, & u_v < 0. \end{cases}$$

$$K_{ca} = - \left. \frac{\partial q_a}{\partial p_a} \right|_{P_0} = \begin{cases} \frac{K_v u_{v0}}{2\sqrt{p_s - p_{a0}}}, & u_v > 0. \\ \frac{-K_v u_{v0}}{2\sqrt{p_{a0} - p_t}}, & u_v < 0. \end{cases}$$

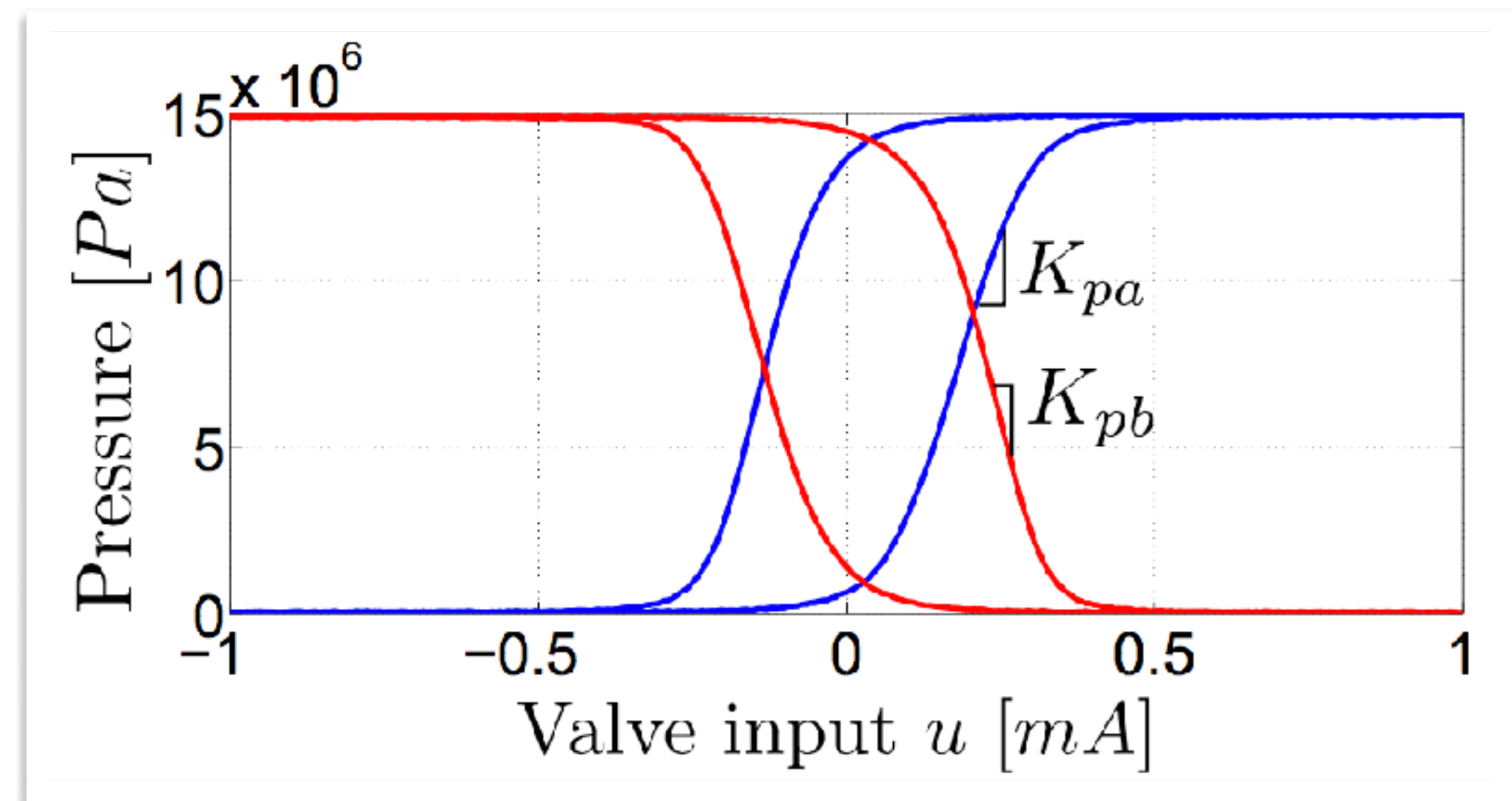
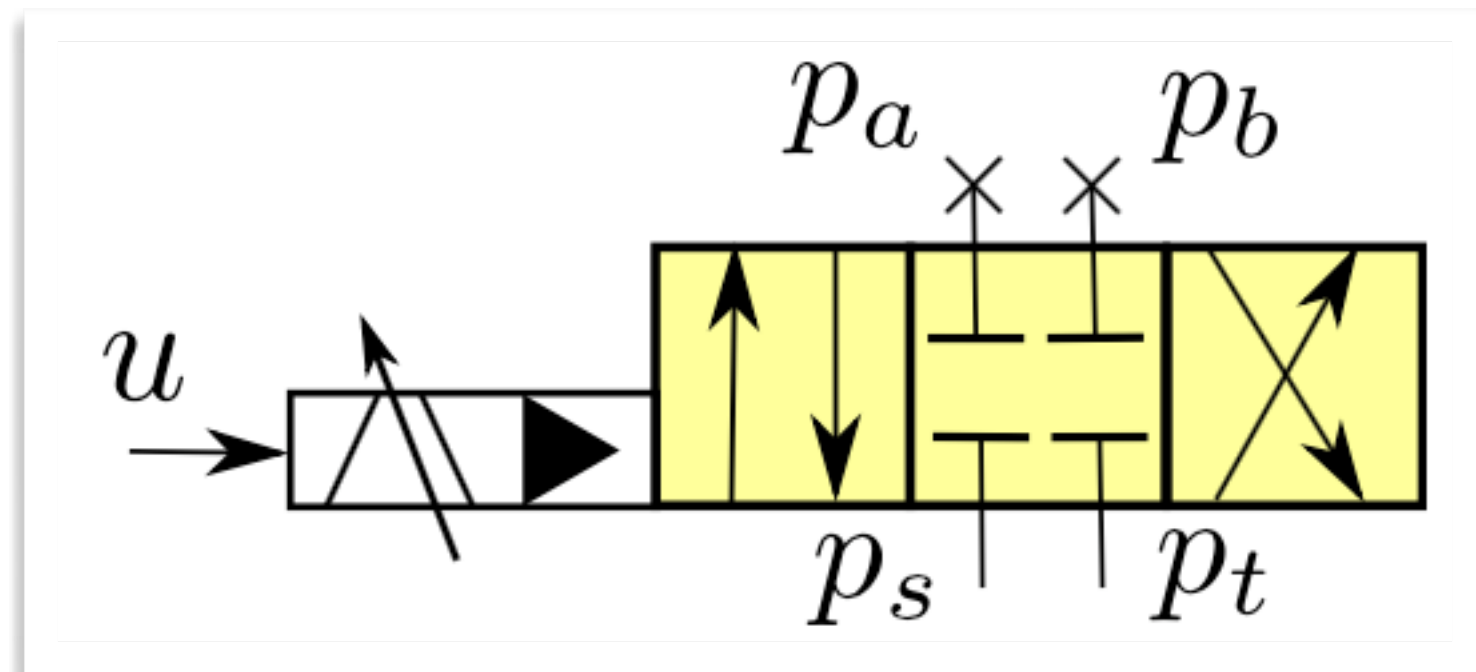
$$K_{qb} = \left. \frac{\partial q_b}{\partial u_v} \right|_{P_0} = \begin{cases} K_v \sqrt{p_{b0} - p_t}, & u_v > 0. \\ K_v \sqrt{p_s - p_{b0}}, & u_v < 0. \end{cases}$$

$$K_{cb} = - \left. \frac{\partial q_b}{\partial p_b} \right|_{P_0} = \begin{cases} \frac{-K_v u_{v0}}{2\sqrt{p_{b0} - p_t}}, & u_v > 0. \\ \frac{K_v u_{v0}}{2\sqrt{p_s - p_{b0}}}, & u_v < 0. \end{cases}$$

Coeficientes da válvula

$$K_{pa} = \left. \frac{\partial p_a}{\partial u_v} \right|_{P_0} = \frac{K_{qa}}{K_{ca}} \begin{cases} \frac{2K_v(p_s - p_{a0})}{u_{v0}} & u_v > 0. \\ -\frac{2K_v(p_{a0} - p_t)}{u_{v0}} & u_v < 0. \end{cases}$$

$$K_{pb} = \left. \frac{\partial p_b}{\partial u_v} \right|_{P_0} = \frac{K_{qb}}{K_{cb}} \begin{cases} -\frac{2K_v(p_{b0} - p_t)}{u_{v0}} & u_v > 0. \\ \frac{2K_v(p_s - p_{b0})}{u_{v0}} & u_v < 0. \end{cases}$$



Coeficientes da válvula

Circuitos
hidráulicos

K_{qa}, K_{qb} : ganho de vazão $\left[\frac{m^3/s}{V} \right]$

Modelagem

K_{ca}, K_{cb} : coeficiente de vazão-pressão $\left[\frac{m^3/s}{Pa} \right]$

Conclusão

K_{pa}, K_{pb} : ganho de pressão $\left[\frac{Pa}{V} \right]$

Força hidráulica

$$\Delta \dot{f}_h = \left. \frac{\partial \dot{f}_h}{\partial q_a} \right|_{P_0} \Delta q_a + \left. \frac{\partial \dot{f}_h}{\partial q_b} \right|_{P_0} \Delta q_b + \left. \frac{\partial \dot{f}_h}{\partial \dot{x}_p} \right|_{P_0} \Delta \dot{x}_p =$$
$$\frac{A_p \beta_e}{v_{a0}} (\Delta q_a - A_p \Delta \dot{x}_p) - \frac{\alpha A_p \beta_e}{v_{b0}} (-\Delta q_b + \alpha A_p \Delta \dot{x}_p)$$

$$\Delta \dot{f}_h = K_{\dot{x}_p} \Delta \dot{x}_p + K_{u_v} \Delta u_v + K_{f_h} \Delta f_h$$

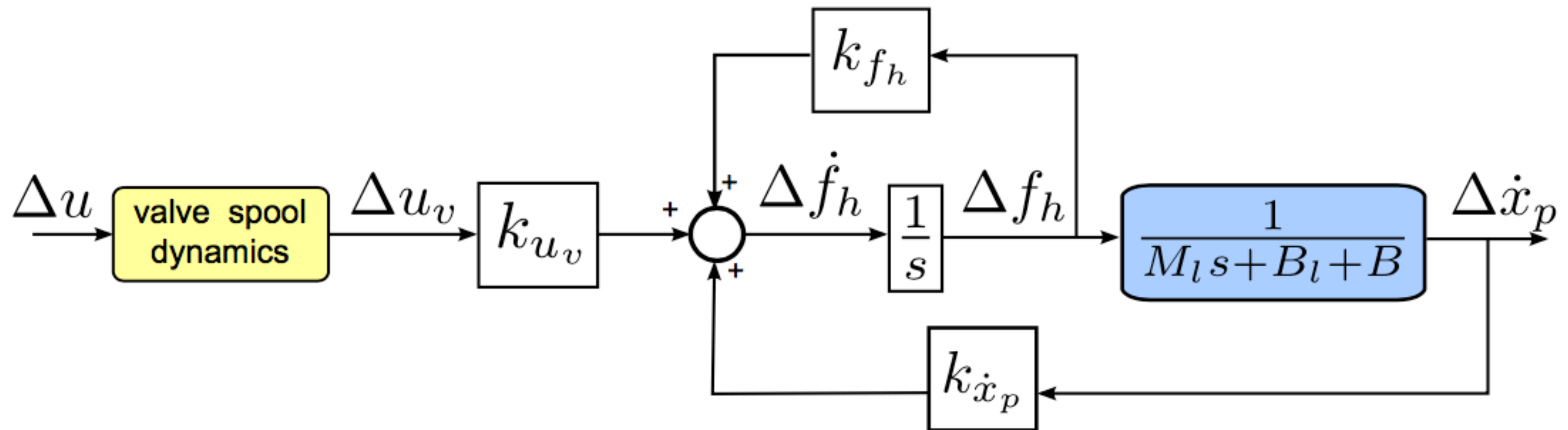
$$K_{\dot{x}_p} = -A_p^2 \beta_e \left(\frac{1}{v_{a0}} + \frac{\alpha^2}{v_{b0}} \right)$$

$$K_{u_v} = A_p \beta_e \left(\frac{K_{q_a}}{v_{a0}} + \frac{\alpha K_{q_b}}{v_{b0}} \right)$$

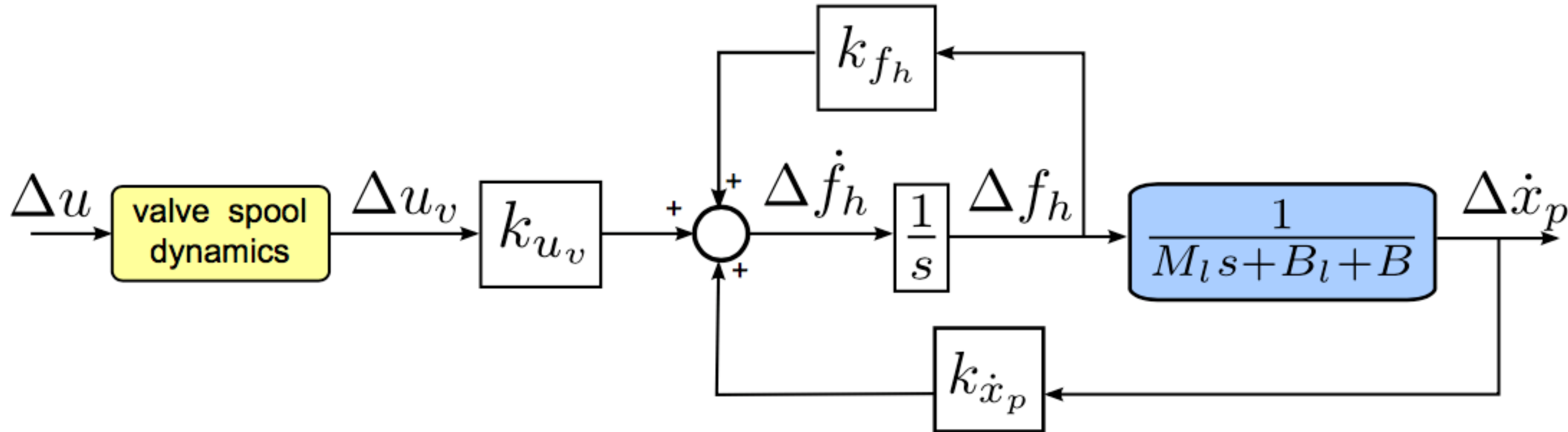
$$K_{f_h} = \frac{\beta_e}{1 + \alpha^3} \left(\frac{K_{c_a}}{v_{a0}} - \frac{\alpha^3 K_{c_b}}{v_{b0}} \right)$$

Força hidráulica

$$\Delta \dot{f}_h = K_{\dot{x}_p} \Delta \dot{x}_p + K_{u_v} \Delta u_v + K_{f_h} \Delta f_h$$

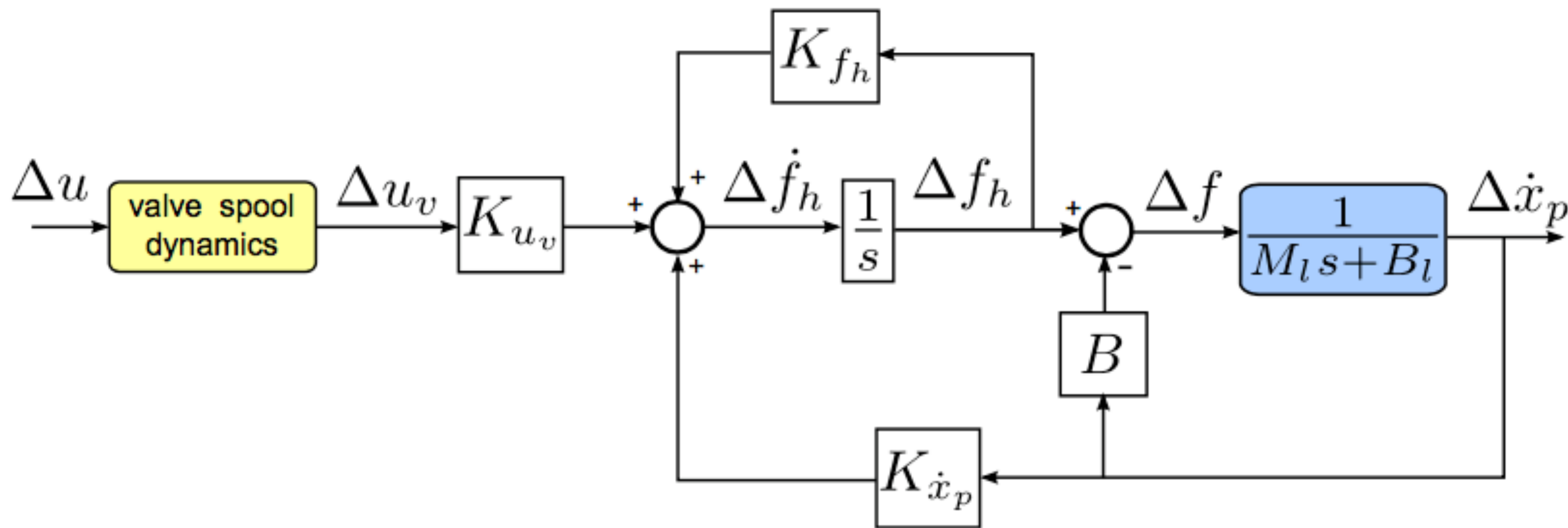
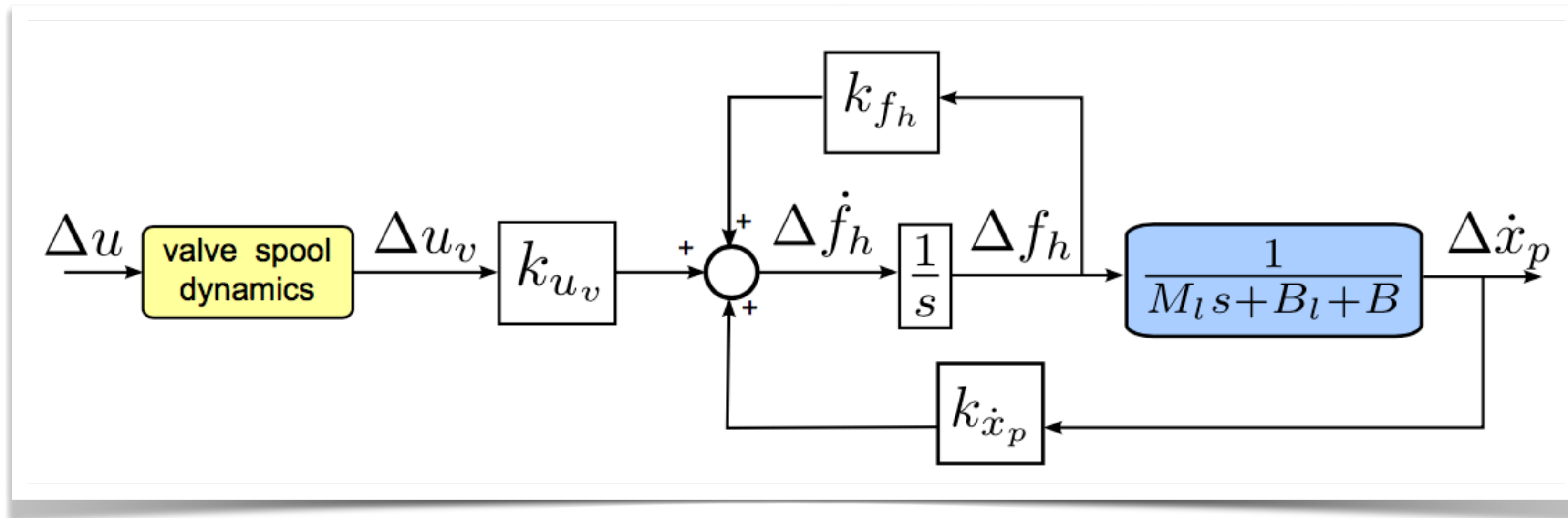


Força hidráulica



$$\frac{\Delta f_h(s)}{\Delta u(s)} = \left(\frac{1}{\frac{1}{\omega_v^2} s^2 + \frac{2D_v}{\omega_v} s + 1} \right) \left(\frac{K_{u_v} (M_l s + B_l + B)}{(s - K_{f_h})(M_l s + B_l + B) - K_{\dot{x}_p}} \right)$$

Força de carga



Conteúdo

Circuitos
hidráulicos

Modelagem



- Bibliografia
- Projeto PJ2

Conclusão

Referência bibliográfica

Circuitos
hidráulicos



Apostila “Painel simulador de Hidráulica Industrial e Eletro-hidráulica”.



Festo Didactic

Modelagem

T. Boaventura, “Hydraulic compliance control of the quadruped robot HyQ,” Ph.D. dissertation, Istituto Italiano di Tecnologia and University of Genoa, Italy, 2013 (Cap. 3)

Conclusão

Projeto PJ2

Circuitos
hidráulicos

Implementar circuitos hidráulicos na
plataforma de simulação:

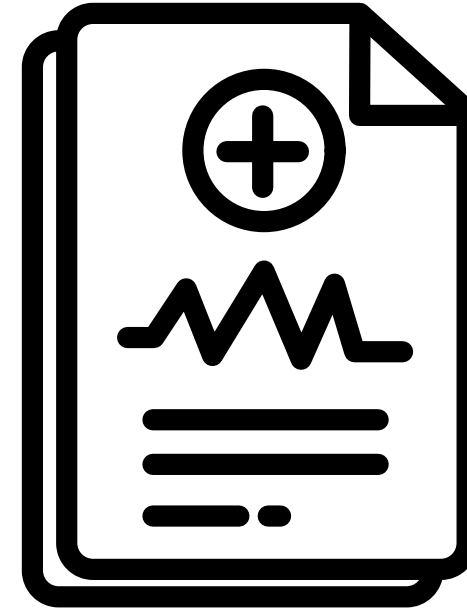


Modelagem

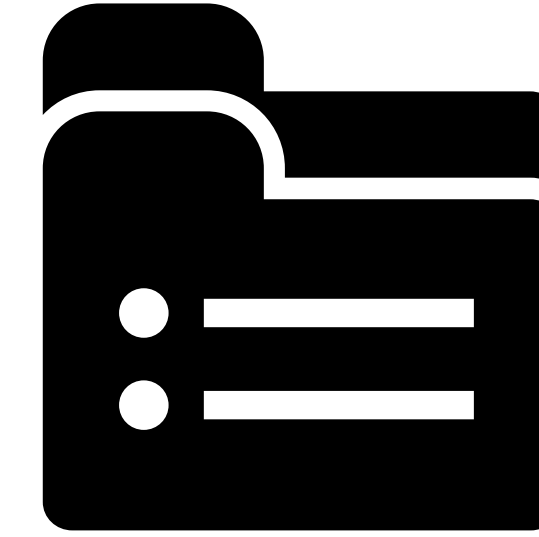
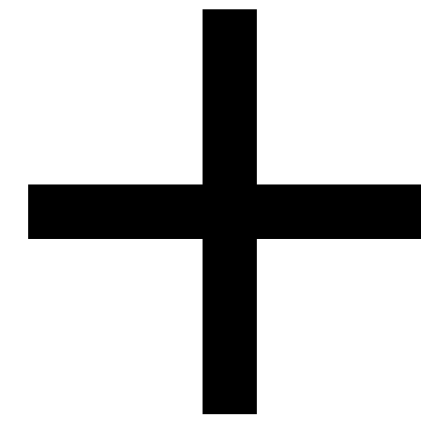
Conclusão

Projeto PJ2: deliverables!

Circuitos
hidráulicos



relatório



arquivos de
simulação

Modelagem

Conclusão

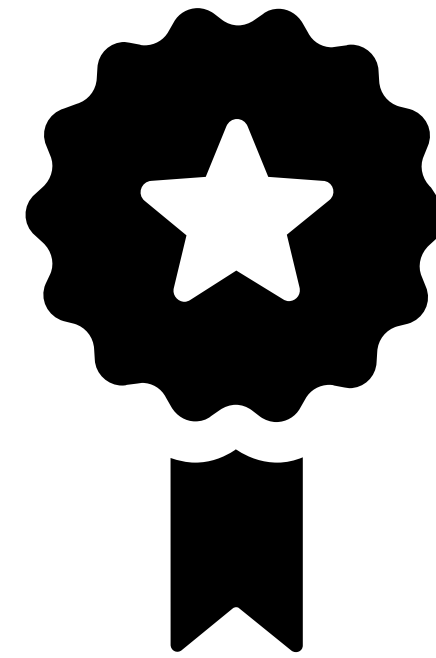
- 1. Transcrição do enunciado**
- 2. Desenho técnico do circuito hidráulico**
- 3. Gráficos de posição e velocidade (para cada atuador), pressão, vazão e comando na válvula.**

Projeto PJ2

Circuitos
hidráulicos

Modelagem

Conclusão

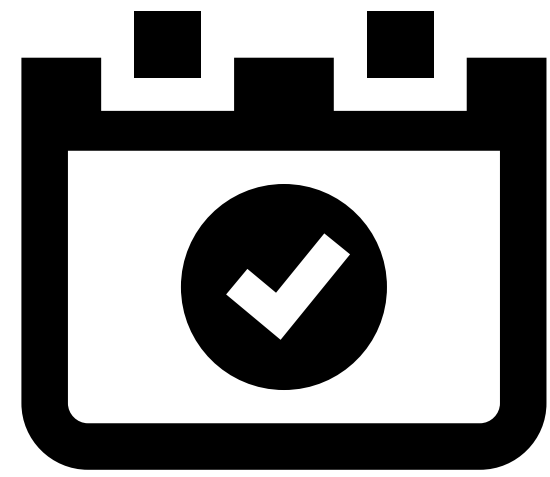


avaliação

- 1. Correção da simulação**
- 2. Organização e clareza do relatório**

Projeto PJ2

Circuitos
hidráulicos



data de
entrega

Domingo

08/Maio

23:59

Modelagem

Conclusão

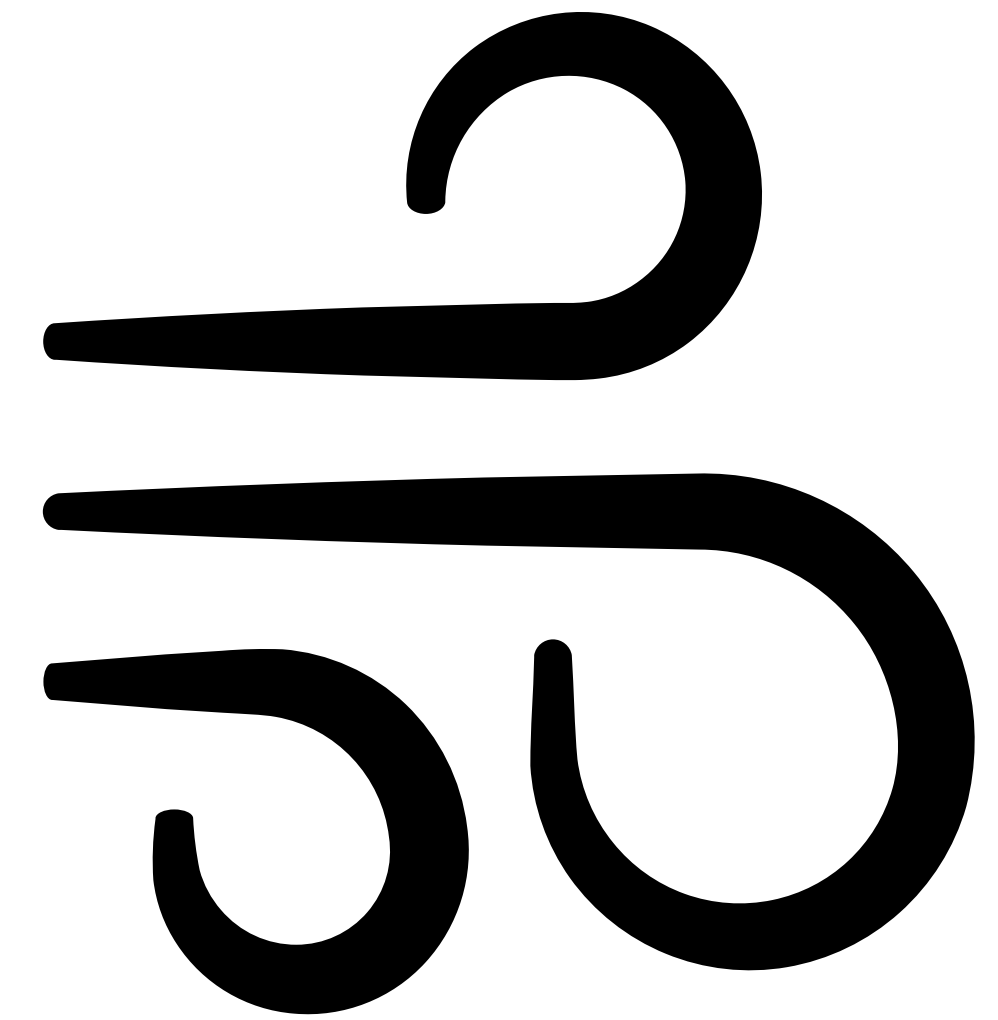
Próxima aula

Circuitos
hidráulicos

Modelagem

Conclusão

Introdução
a sistemas
pneumáticos





That's all Folks!