



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
LABORATÓRIO DE SISTEMAS HIDRÁULICOS E PNEUMÁTICOS

**LASHIP** EMC  
UFSC  
Hidráulica & Pneumática

## **Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos para Automação e Controle**

### **PARTE I – Princípios Gerais da Hidráulica e Pneumática**

**Prof. Victor Juliano De Negri, Dr. Eng.**

**Florianópolis, Março de 2001**

**Escritório de Direitos Autorais – N° registro: 328.561 – Livro: 602 – Folha: 221 – Obra não publicada**

## Índice

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Contexto da Hidráulica e Pneumática.....</b>	<b>2</b>
2.1	Tecnologias para ação mecânica.....	2
2.2	Sistemas de automação e controle.....	7
<b>3</b>	<b>Princípios físicos fundamentais.....</b>	<b>13</b>
3.1	Fluidos hidráulicos e pneumáticos.....	13
3.2	Princípio de Pascal.....	16
3.3	Compressibilidade dos fluidos.....	17
3.3.1	Expressão do módulo de compressibilidade.....	19
<b>4</b>	<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>21</b>

# PARTE I –PRINCÍPIOS GERAIS DA HIDRÁULICA E PNEUMÁTICA

## 1 Introdução

Por sua natureza, os sistemas hidráulicos e pneumáticos constituem-se em uma forma concreta de aplicação dos princípios da mecânica dos fluidos compressível e incompressível a qual embasa o desenvolvimento de componentes e circuitos.

Por outro lado, os conceitos de automação e controle estão intimamente relacionados com a hidráulica e pneumática, pois esta área da tecnologia possui dispositivos para atuação mecânica rotacional e translacional para uma vasta gama de forças, torques, velocidades e rotações. O estudo da automação e controle engloba diversas áreas como lógica Booleana, Teoria de controle, metrologia e mecatrônica.

Assim sendo, conforme será visto de maneira introdutória no decorrer deste trabalho, a efetiva compreensão desta área implica em mesclar estas várias disciplinas enfatizando alguns aspectos para o domínio da hidráulica e outros mais para a pneumática.

## 2 Contexto da Hidráulica e Pneumática

### 2.1 Tecnologias para ação mecânica

As máquinas e processos são projetados e construídos para cumprir objetivos variados como produção de peças, embalagem de produtos, preparação de substâncias, transporte entre estações de trabalho etc. Essencialmente, estes objetivos são alcançados principalmente por meio de ações mecânicas que produzem movimentos lineares ou rotativos, conforme ilustrado nos exemplos a seguir.

Na figura 2.1 exemplifica-se uma aplicação intensa da hidráulica na indústria que são as máquinas injetoras, onde existem varias atuações tanto para o fechamento e abertura do molde quanto para a injeção da matéria prima. Na figura 2.2 mostra-se um equipamento pneumático destinado à alimentação de uma máquina ferramenta com materiais na forma de painéis.

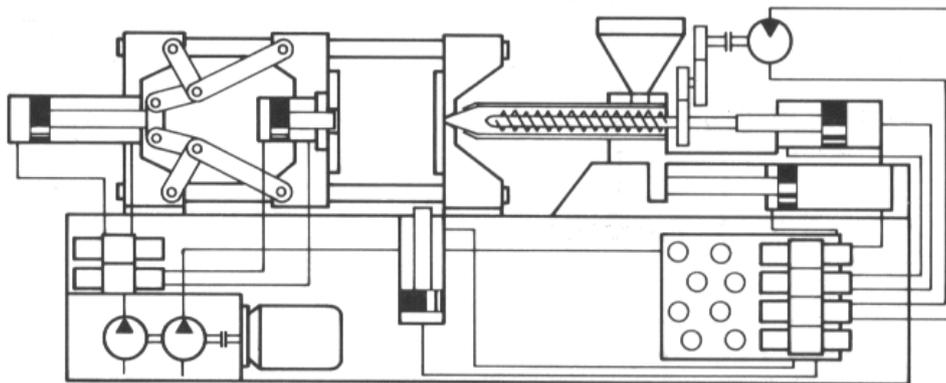


Figura 2.1 – Máquina injetora hidráulica (PAULSON, 1998)

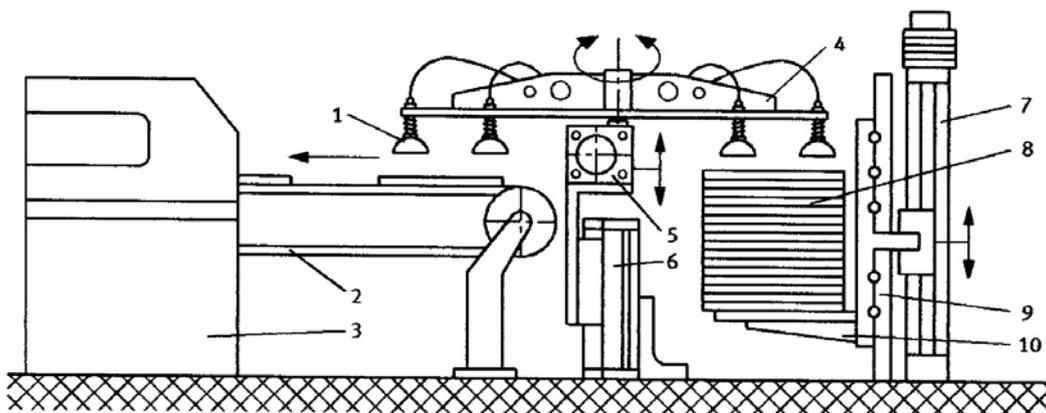


Figura 2.2 – Equipamento pneumático para alimentação de máquina ferramenta composto de: 1) Ventosas; 2) Esteira transportadora; 3) Máquina ferramenta; 4) Braço giratório; 5) Atuador rotativo; 6) Atuador de elevação; 7) Atuador eletromecânico de elevação; 8) Painéis; 9) Guia linear; 10) Plataforma de elevação. (HESSE, 2000)

A utilização da hidráulica e pneumática é bastante intensa não somente na indústria. Na área móbil (ônibus, caminhões, tratores, automóveis etc.) tem-se várias aplicações como na máquina agrícola apresentada na figura 2.3 envolvendo acionamento, direção e posicionamento de implementos. No avião esboçado na figura 2.4 verifica-se também o uso intenso da hidráulica. Uma visão geral do campo de aplicação dos sistemas hidráulicos e pneumáticos encontra-se na figura 2.5.

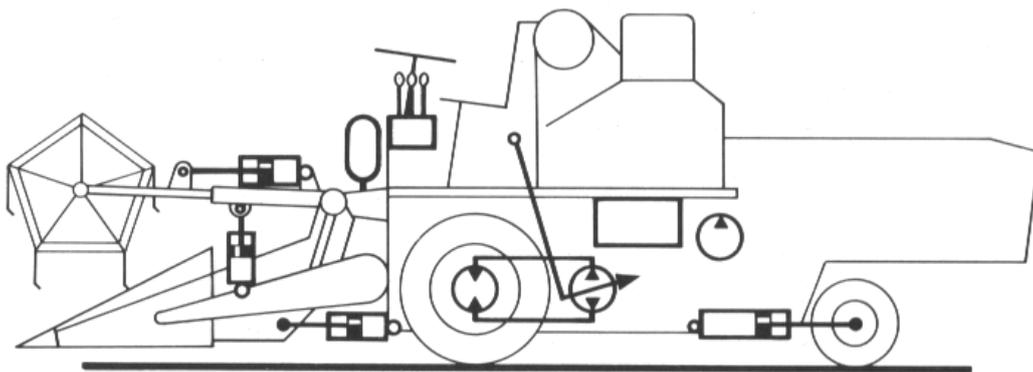


Figura 2.3 – Aplicação da hidráulica em máquinas agrícolas

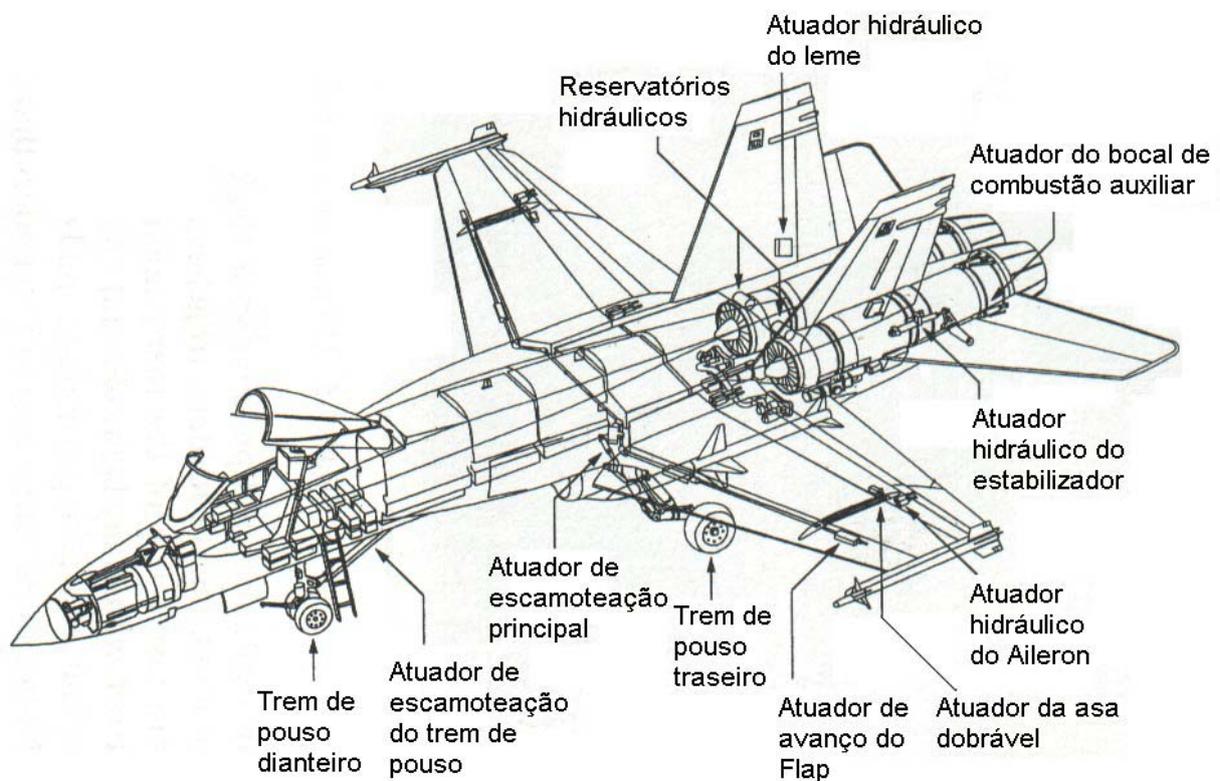


Figura 2.4 – Atuações hidráulicas na aviação. (SULLIVAN, 1998)

Os exemplos acima são uma mostra do potencial de aplicação da hidráulica e pneumática. Porém, igualmente competitiva é a utilização de dispositivos elétricos e mecânicos isoladamente ou em conjunto entre si e com a H&P. Seja qual for a tecnologia escolhida, sempre se deseja que os dispositivos promovam ações mecânicas através do controle de força ou torque, posição linear ou angular e velocidade linear ou rotação. As figuras 2.6 a 2.10 apresentam alguns exemplos de atuadores.

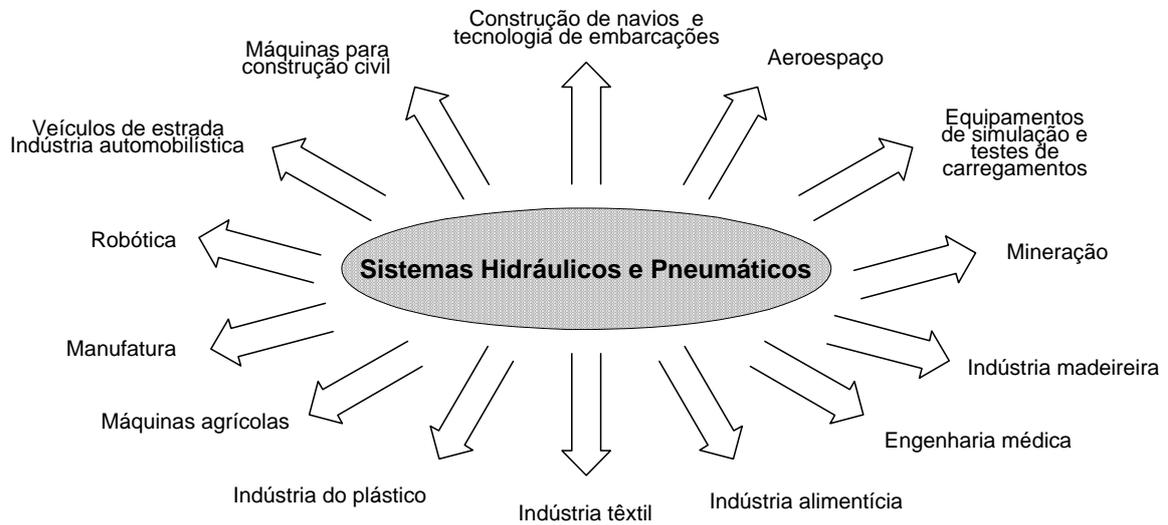


Figura 2.5 – Campos de aplicação da hidráulica e pneumática. (IVANTYSNOVA, 1998).

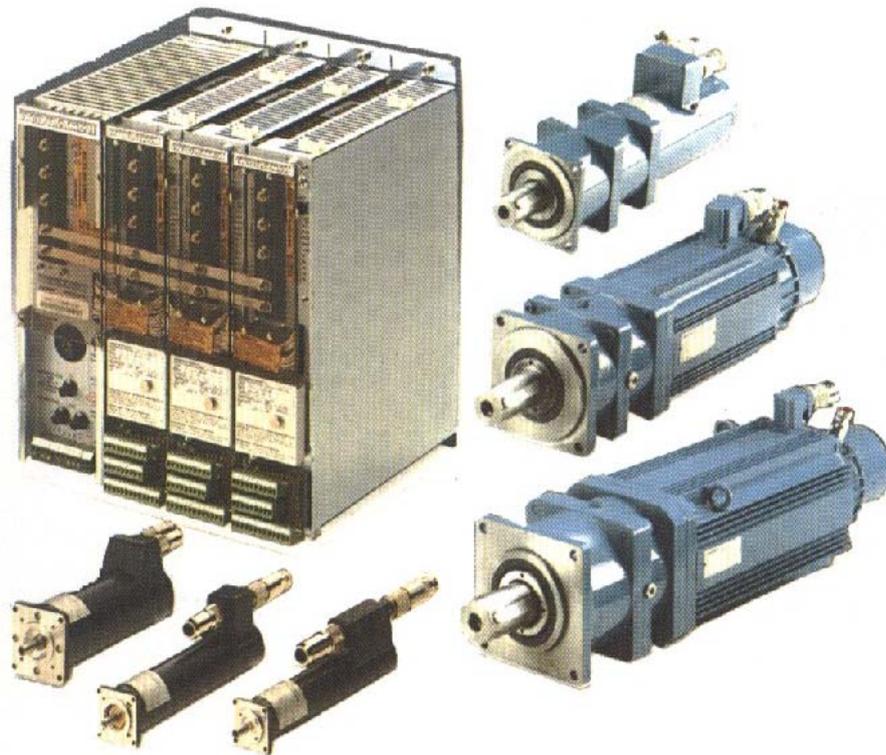


Figura 2.6– Servo-motores de Corrente Alternada com módulo de controle (MANNESMANN REXROTH, 199-\_)

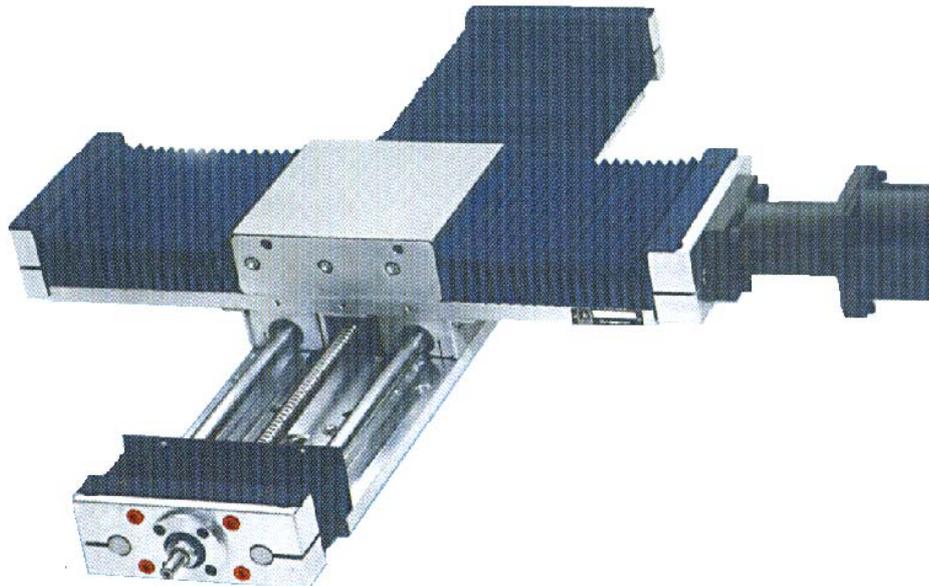


Figura 2.7 - Acionamento linear utilizando servo-motores (motores elétricos com fusos) (MANNESMANN REXROTH, 199-\_)

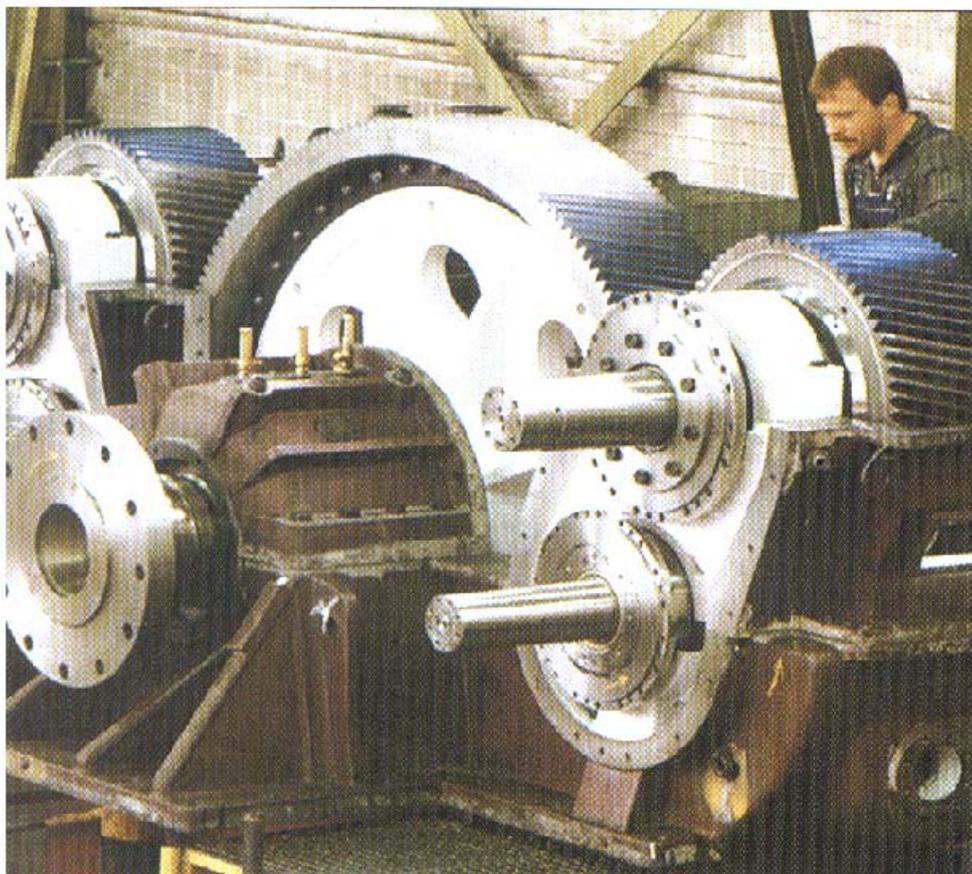


Figura 2.8 – Transmissão mecânica por engrenagens (MANNESMANN REXROTH, 199-\_)

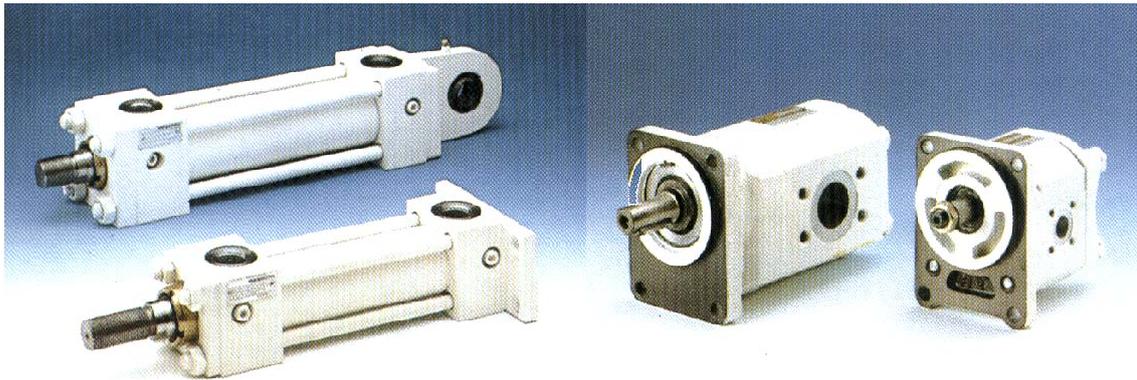


Figura 2.9 – Exemplos de motores e cilindros hidráulicos (MANNESMANN REXROTH, 199-)



Figura 2.10 – Exemplos de cilindros, motores e osciladores pneumáticos (FESTO, 1990)

O momento exato da atuação ou a forma como esta deve ocorrer (lentamente, em rampa, com um determinado erro máximo etc.) deve ser controlada. Para tal deve ser permitido o comando por parte do operador com um esforço mínimo e de forma bastante facilitada. O meio mais confortável para ação do operador atualmente é através de chaves, botões, teclados, toques em telas etc. onde a ação do operador fornecerá um sinal elétrico que será transmitido para dispositivos adequados.

Do conjunto de princípios de atuação apresentados acima (elétricos, mecânicos, hidráulicos e pneumáticos), com os meios mecânicos encontra-se maior dificuldade em interfacear com sinais elétricos de comando. Com motores e acionamentos lineares elétricos é evidente a facilidade de

recepção de sinais elétricos. Os atuadores hidráulicos e pneumáticos, conforme será visto ao longo deste trabalho, são comandados por meio de válvulas que podem ser eletro-hidráulicas ou eletropneumáticas, possibilitando, portanto, o interfaceamento com sinais elétricos vindos de botões ou mesmo de CLP's (Controladores Lógicos Programáveis).

A seleção da tecnologia para atuação depende de vários aspectos como custo, condições ambientais, manutenibilidade, confiabilidade etc. Exclusivamente sob o ponto de vista de requisitos técnicos, a figura 2.11 apresenta os domínios de utilização de sistemas hidráulicos (H), conjuntos motor elétrico-fuso (M), pneumática (P) e motor de passo (S), em função da força e velocidade requeridos para uma dada aplicação.

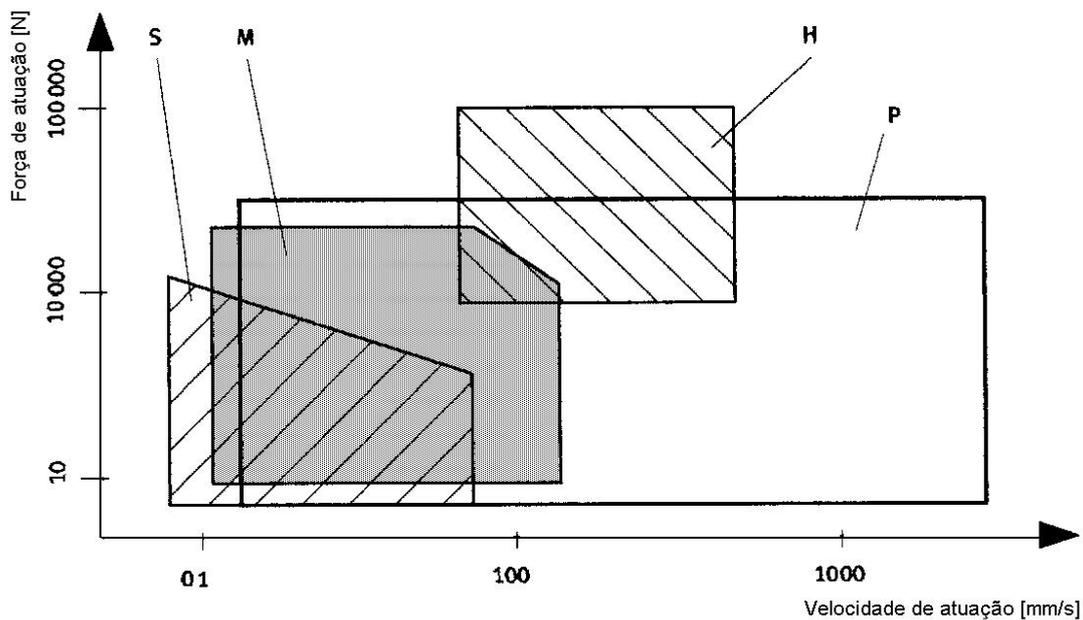


Figura 2.11 – Campos de aplicação de tecnologias para automação e controle (HESSE, 2000)

## 2.2 Sistemas de automação e controle

Todos os exemplos de máquinas, equipamentos e circuitos veiculares apresentados na seção anterior são conhecidos como sistemas de automação e/ou sistemas de controle. Ou seja, a existência de automação ou controle implica no emprego de dispositivos como os mostrados nas figuras 2.6 a 2.10.

Assim, para uma melhor compreensão da área de hidráulica e pneumática, é importante o entendimento acerca dos termos **sistema de automação** e **sistema de controle**:

**Sistema de Automação:** Emprega-se esta denominação quando se interpreta que um conjunto de componentes interconectados tem como função principal a realização de uma ou mais ações segundo uma lógica pré-determinada e em resposta à ocorrência de eventos. As ações podem ser o avanço ou recuo de um cilindro, o acionamento ou não de uma ventosa, o acionamento ou parada de um motor



cilindro, ou de vazão ou pressão em um circuito. O comportamento destas variáveis é observado no tempo, isto é, está-se interessado em verificar, por exemplo, em quanto tempo uma posição é alcançada ou qual a magnitude das oscilações e picos de pressão que estão ocorrendo no circuito.

A figura 2.13 apresenta vários aspectos de um sistema de controle eletro-hidráulico composto de uma servoválvula, um cilindro hidráulico de dupla ação, um sistema de medição de posição e um controlador proporcional.

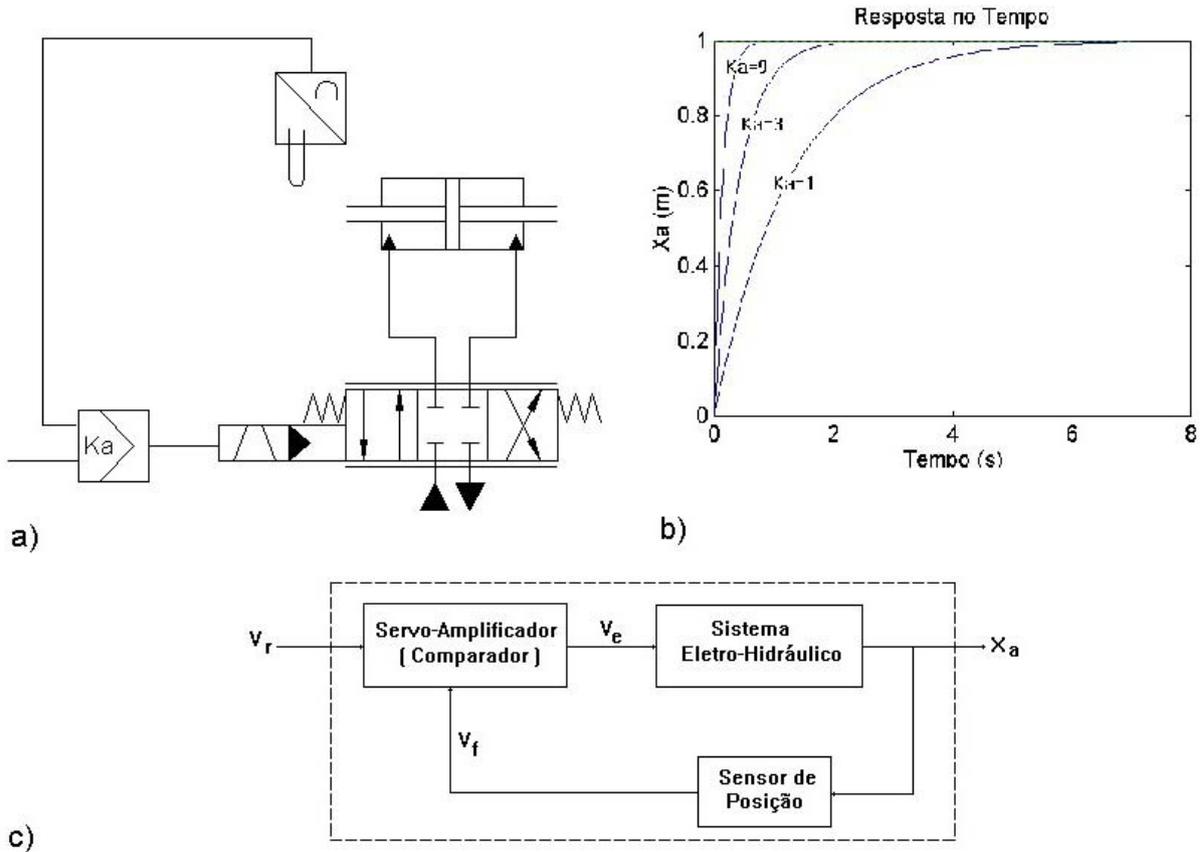


Figura 2.13 – Exemplo de controle eletro-hidráulico: a) Diagrama de circuito; b) Resposta a uma entrada em degrau; c) Diagrama de blocos.

O termo **automação** tem uma abrangência maior que **controle**, pois algumas ações lógicas, quando observadas mais detalhadamente, incluem tarefas de controle. Seria o caso se se considerasse que o circuito de atuação composto pelo atuador 1A1 + válvula 1V1 (figura 2.12) devesse executar um posicionamento preciso e, para tal, empregasse-se a solução mostrada na figura 2.13 ou uma solução pneumática equivalente. Assim, dentro de um conjunto de ações logicamente encadeadas, ter-se-ia um sistema de controle.

Tem-se adotado o termo **sistema automático** para designar uma aplicação que envolva automação e/ou controle, ou seja, pode-se observar o problema segundo uma visão lógica ou então de

maneira mais aprofundada, avaliando, ao longo do tempo, a resposta da posição, força, velocidade, vazão ou qualquer outra variável.

Para que se possa projetar, instalar ou realizar a manutenção de um sistema automático, isto é, de um sistema de automação e/ou controle, é importante que se entenda claramente quais suas partes principais e como são interligadas. Para tal, pode-se observar um equipamento pneumático destinado à conformação e selagem de produtos fabricados com filmes plásticos (figura 2.14) a qual, a partir do rolo de filme, a estação de conformação puxa o comprimento necessário de filme e leva para o molde. Neste momento é feita a conformação através de uma ferramenta de várias faces. Ao final os moldes prontos são transferidos para a estação de selagem.

Na estação de selagem, o papel para o empacotamento é ordenado em um magazine, colocado sobre o copo ou recipiente moldado com os filmes e selado a quente. O pacote concluído é expulso para um escorregador.

Neste sistema, observa-se os seguintes elementos:

- Cilindros pneumáticos destinados à operação sobre os filmes e moldes;
- Sensores para detecção de fim-de-curso de cilindros e presença de produtos.
- Botões e lâmpadas sinalizadoras para interação com o operador;
- Controladores programáveis.

Os sensores têm a função de captar informações do equipamento ou processo e enviar para o controlador programável, da mesma forma que os botões, os quais recebem os comandos do operador. Após processar as informações recebidas, o controlador aciona os cilindros por intermédio de válvulas eletropneumáticas e emite, quando necessário, sinais luminosos para o operador.

O que se observa neste exemplo pode ser expandido para todos os sistemas automáticos, independentemente do domínio da aplicação e da complexidade deste. Assim sendo, um sistema automático pode ser decomposto em duas partes: um subsistema de informação e um subsistema energético/material, conforme representado na figura 2.15. O **sistema de informação** engloba os equipamentos que processam sinais e dados, tais como computadores, controladores lógicos programáveis, controladores analógicos e digitais, válvulas de processamento de sinais (válvulas 'E' e 'OU'), entre outros. Por sua vez, o **sistema energético/material (processo)** sintetiza as partes de máquinas e equipamentos que transformam ou processam energia e/ou matéria.

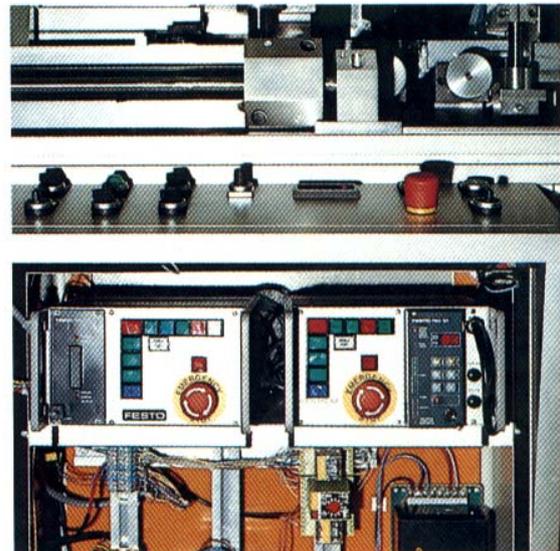
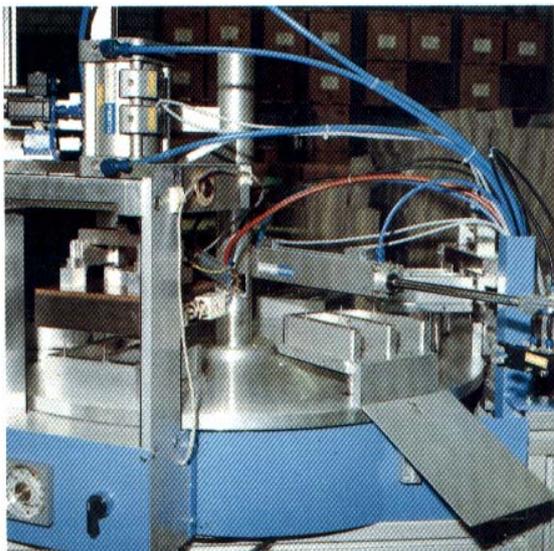
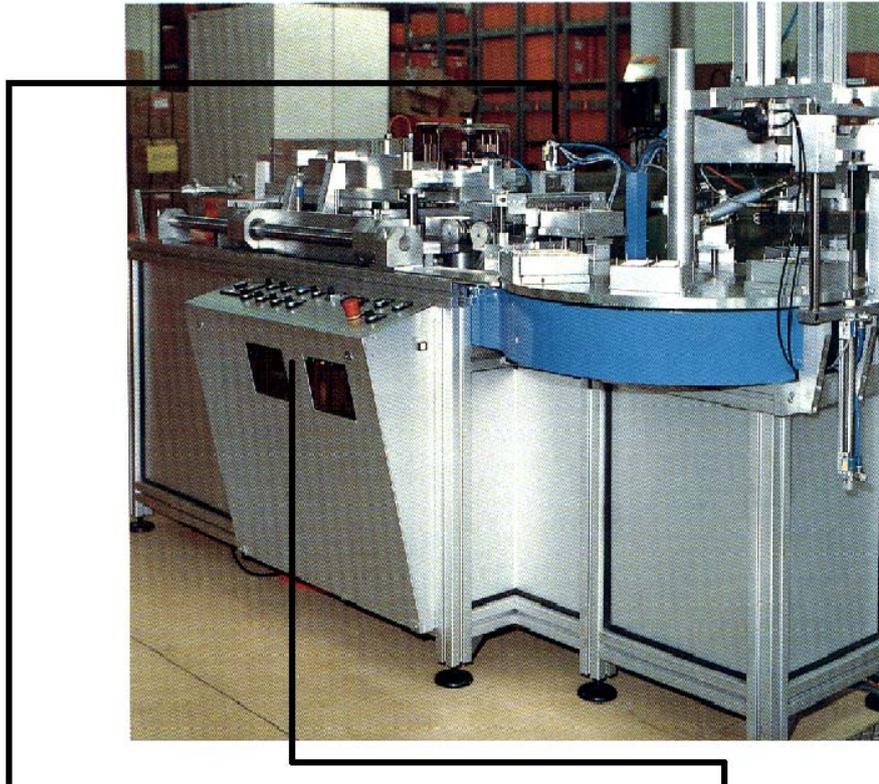


Figura 2.14 – Exemplo de um sistema automático: Equipamento pneumático de conformação e selagem de produtos fabricados com filmes plásticos. (MANNESMANN REXROTH, 199-)\*.

Um circuito hidráulico pode ser citado como um *sistema energético* pois sua operação baseia-se na conversão, transferência e controle de energia hidráulica. Um *sistema material* pode ser exemplificado através de uma linha de produção, que recebe matéria prima e, após diversas operações como separação, usinagem, transporte, empacotamento etc., fornece o produto acabado.

Assim, conforme indicado na figura 2.15, o sistema de informação deve ser capaz de extrair

informações da parte energético/material, processá-las e, posteriormente, utilizá-las para alterar o funcionamento deste. Além da troca de informações entre estes dois subsistemas, há também o recebimento e fornecimento de energia (ene), matéria (mat) e informação (inf) em relação ao ambiente externo.

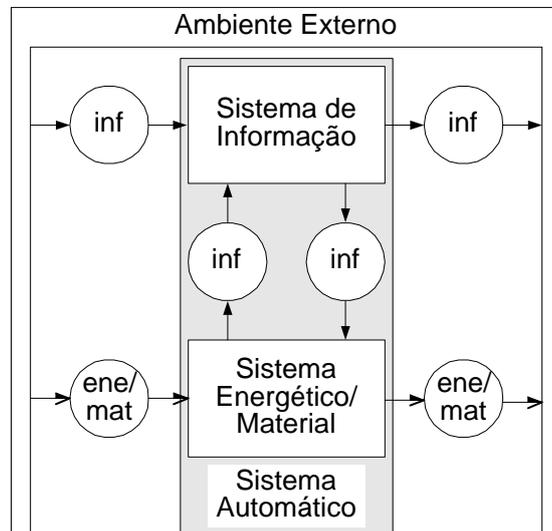


Figura 2.15 - Representação de um sistema automático (DE NEGRI, 1996)

Correlacionando-se as figuras 2.14 e 2.15, conclui-se que:

- Controlador Programável: Pertence ao **sistema de informação**;
- Base da máquina, dispositivos de fixação etc.: Constituem o **sistema energético/material**;
- Operador e equipamentos que fornecem os filmes e papéis e retiram as embalagens seladas: **Ambiente externo**;
- Botões = Transferem as **informações** que vêm do ambiente externo;
- Sinais luminosos = Correspondem às **informações** que vão para o ambiente externo;
- Filmes e papéis = Correspondem à **matéria** proveniente do ambiente externo;
- Embalagens seladas = Correspondem à **matéria** que vai para ambiente externo;

Nesta correlação, falta a identificação dos sensores e atuadores. Estes, na verdade, são os dispositivos físicos que realizam a troca de informações internas, ou seja, os sensores e as válvulas hidráulicas e pneumáticas, com os respectivos cilindros ou motores, são a interface entre o sistema de informação e o sistema energético/material. Portanto, as características destes dispositivos apresentam influência significativa sobre o desempenho do sistema global.

A especificação, dimensionamento ou mesmo projeto dos atuadores, como os apresentados na seção 2.1, requerem a compreensão do funcionamento destes. Na hidráulica e pneumática, os princípios básicos são idênticos conforme apresentado no capítulo seguinte. Conhecendo-se o modo de operação de um sistema que envolve ar comprimido ou fluido hidráulico é possível otimizar o projeto e identificar a causa de diversas falhas destes sistemas automáticos.

### 3 Princípios físicos fundamentais

#### 3.1 Fluidos hidráulicos e pneumáticos

**Hidráulica e Pneumática** é a tecnologia associada com a geração, controle e transmissão de potência empregando *fluidos pressurizados*. A diversidade de campos de aplicação da hidráulica e pneumática incluindo, por exemplo, direções e freios de automóveis, acionamentos em máquinas ferramentas, controles de aeronaves, alimentação de processos, lançamento de veículos espaciais, máquinas colheitadeiras, mineração, equipamentos odontológicos etc., demonstra que é quase impossível encontrar um produto manufaturado que não tenha sido afetado por esta tecnologia em algum estágio de sua produção ou distribuição.

Um **fluido** é uma substância que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento, não importando quão pequena possa ser esta tensão. Uma força de cisalhamento é a componente tangencial da força que age sobre a superfície e, dividida pela área da superfície, dá origem à tensão de cisalhamento média sobre a área.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

De acordo com os estados físicos da matéria, os fluidos compreendem as fases líquida e gasosa. A distinção de um fluido e os demais estados possíveis da matéria torna-se clara quando comparado um fluido, segundo a definição acima, com o comportamento de um sólido. Um sólido é uma substância que se deforma quando a tensão de cisalhamento é aplicada, mas não continua a se deformar. A figura 3.1 ilustra a deformação sofrida por um bloco sólido quando submetido a uma força tangencial constante (F) e a deformação continuada que ocorre em um fluido em função de uma força tangencial, mesmo que infinitamente reduzida.

Uma substância plástica (p. ex.: parafina) não pode preencher a definição de fluido porque a mesma tem uma tensão de cisalhamento inicial que deve ser superada para depois se ter uma deformação contínua. Uma substância elástica colocada entre duas placas sofreria uma determinada deformação proporcional à força, mas não continuamente em velocidade finita. Colocando areia entre as duas placas, o atrito seco iria requerer uma força finita para causar um movimento contínuo; assim a areia não satisfaz a definição de fluido.

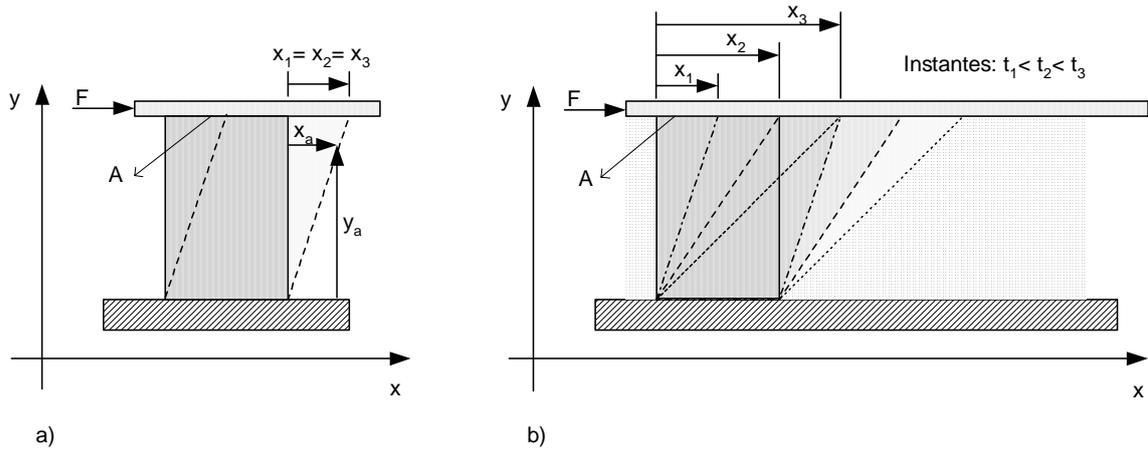


Figura 3.1 – Deformação ocorrida entre duas placas com movimento relativo: a) Meio sólido; b) Meio fluido (SHAMES, 1973)

A experiência mostra que a tensão de cisalhamento para um fluido pode ser expressa como:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \tag{3.2}$$

a qual estabelece a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de variação da velocidade do fluido em relação ao eixo y para um escoamento unidimensional. O fator de proporcionalidade  $\mu$  é chamado viscosidade do fluido, mais especificamente, viscosidade dinâmica. A velocidade do fluido corresponde à taxa de variação do deslocamento do fluido em relação ao tempo, ou seja, junto à parede móvel tem-se:

$$v = \frac{dx}{dt} \cong \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \cong \frac{x_3 - x_2}{t_3 - t_2} \tag{3.3}$$

Os fluidos empregados em circuitos hidráulicos e pneumáticos são fluidos newtonianos, isto é,  $\mu$  é constante na equação 3.2. Na figura 3.2 adequa-se o modelo genérico da figura 3.1 para os circuitos H&P identificando-se o movimento relativo entre êmbolo e camisa de um cilindro e o movimento do fluido em uma tubulação (neste último caso, as paredes estão imóveis e fluido é que se movimenta).

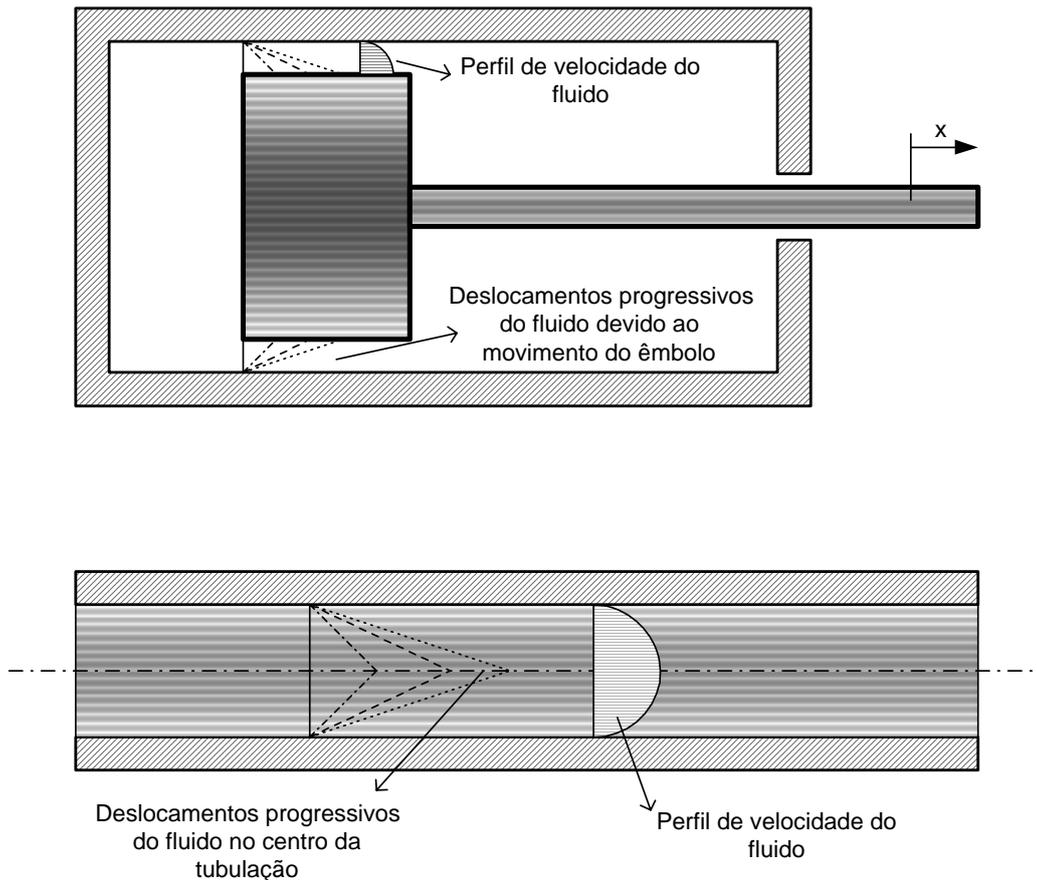


Figura 3.2 – Deformação do fluido em sistemas H&P: a) Entre corpo e êmbolo de um cilindro; b) No interior de uma tubulação.

Outra característica importante dos fluidos diz respeito à compressibilidade. Observa-se que alguns fluidos sofrem pequena variação da massa específica mesmo com grandes variações de pressão, sendo tratados como **incompressíveis**. Estes fluidos apresentam-se permanentemente no estado líquido. Quando não se pode considerar a massa específica constante, como em um gás, o fluido é denominado **compressível**.

Quando se estudam os **sistemas pneumáticos**, que utilizam ar comprimido, o fluido é tratado como *não-viscoso*, isto é, não é requerido nenhum esforço para movimentar uma placa em relação à outra independentemente da velocidade desta placa. Por sua vez é fundamental incluir o efeito da *compressibilidade* para o dimensionamento das válvulas, cilindros e motores.

Por sua vez, os **sistemas hidráulicos** empregam líquidos, como óleos minerais, fluidos à base de água e fluidos sintéticos, tratados como *viscosos* e, na maioria das vezes, como **incompressíveis**. É importante destacar que o dimensionamento estático de sistemas hidráulicos é conduzido considerando-se o fluido incompressível porém, nas aplicações que envolvem controle proporcional ou servo, o efeito da variação da massa específica com a pressão é crucial para o projeto e entendimento destes sistemas.

### 3.2 Princípio de Pascal

O funcionamento dos sistemas hidráulicos e pneumáticos é determinado fundamentalmente pelas leis que regem o comportamento de fluidos confinados, tanto em repouso quanto em movimento constante ou variável. A base para a transmissão de energia através de fluidos é o Princípio de Pascal (Blaise Pascal) o qual estabelece que “se uma força externa for aplicada sobre uma parcela de área de um fluido confinado, a pressão decorrente será transmitida integralmente a todo o fluido e à área do recipiente que o contém”. (von Linsingen, 2001). Este princípio pode ser estendido para demonstrar a transmissão e multiplicação de forças, conforme mostrado na figura 3.3, onde a aplicação de uma força  $F_1$  de baixa magnitude é capaz de fazer com que seja suportada uma força  $F_2$  de maior magnitude.

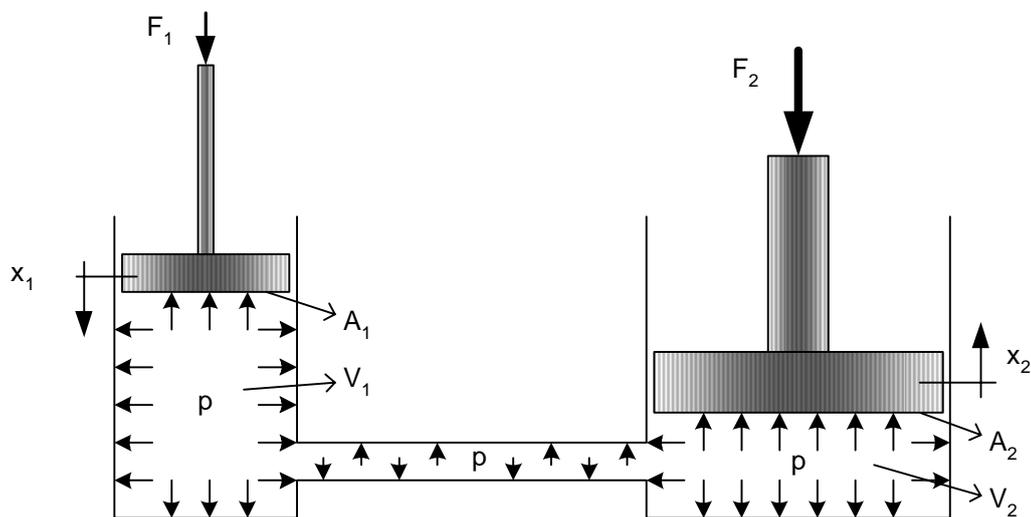


Figura 3.3 - Aplicação do Princípio de Pascal para transmissão e multiplicação de forças.

Sempre que este circuito estiver em equilíbrio, isto é, os êmbolos estiverem parados, a pressão estará igualmente distribuída em todo o fluido de modo que:

$$p = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \tag{3.4}$$

Como os sistemas H&P têm por objetivo fundamental a geração de uma força ou torque através de uma haste ou eixo, o circuito apresentado na figura 3.3 pode ser considerado a essência dos circuitos hidráulicos e pneumáticos reais, onde uma bomba ou compressor transfere fluido, através de tubulações e válvulas de controle, para um atuador, seja linear ou rotativo.

A lei de Pascal é válida quando se desconsidera o peso próprio do fluido, o que é perfeitamente válido para a maioria das aplicações em H&P, e é aplicável para fluidos compressíveis e

incompressíveis desde que se aguarde tempo suficiente para que seja atingido o equilíbrio da pressão em todo o sistema.

### 3.3 Compressibilidade dos fluidos

Os sistemas H&P muitas vezes apresentam alguns efeitos facilmente perceptíveis pelo usuário de uma máquina como:

- o movimento não uniforme de cilindros pneumáticos quando sujeitos a cargas externas variáveis, exigindo muitas vezes o uso de atuadores hidro-pneumáticos;
- O atraso na movimentação de um cilindro pneumático após o acionamento da válvula direcional;
- Os picos de pressão que ocorrem em circuitos hidráulicos;
- As oscilações no posicionamento de um cilindro hidráulico.

Estes efeitos, dentre outros, são originados pela compressibilidade do fluido (ar comprimido ou fluido hidráulico) que, conforme mencionado anteriormente, corresponde à variação da massa específica com a pressão e também com a temperatura. Como a massa específica é dada pela relação entre a massa de fluido e o volume que este ocupa, isto é

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.4)$$

a sua variação implica que um mesmo volume pode conter diferentes massas. Considerando-se o efeito da compressibilidade na figura 3.3, a redução do volume  $V_1$ , devido a um aumento na força  $F_1$ , não provoca um aumento equivalente no volume  $V_2$ , mesmo quando atingida uma pressão  $p$  uniforme e constante.

A compressibilidade dos fluidos, seja na hidráulica como na pneumática, é um fator determinante para o entendimento do comportamento dos circuitos. Em uma análise preliminar, pode-se observar o que ocorre na câmara 1 do cilindro 1 mostrado na figura 3.4, o qual está avançado devido à ação de uma mola com uma determinada pré-carga.

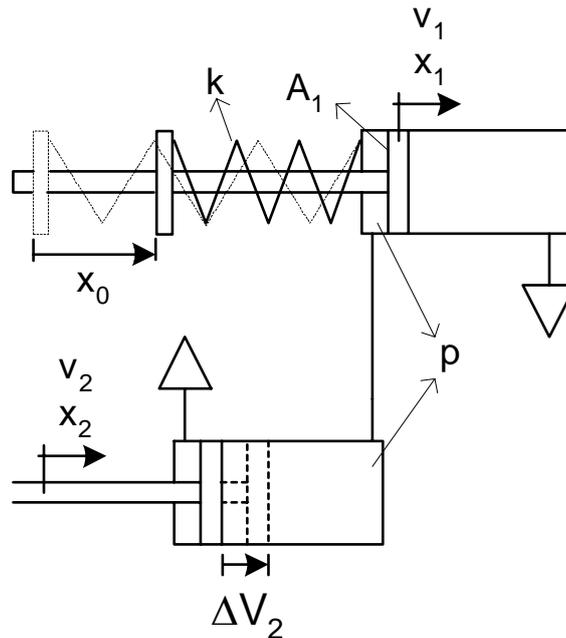


Figura 3.4 – Efeito da compressibilidade: Cilindro 2 acionando cilindro 1

Para que o êmbolo 1 se desloque é necessário que a pressão na câmara produza uma força superior a decorrente da pré-carga da mola, ou seja:

$$F = A_1 \cdot p \geq kx_0 \tag{3.5}$$

Através do deslocamento do êmbolo do cilindro 2 com uma velocidade  $v_2$ , produz-se uma variação no volume  $\Delta V_2$  num determinado intervalo de tempo  $\Delta t$  que corresponde a uma vazão ( $qv_2$ ) que será transmitida para o cilindro  $A_1$ , isto é:

$$qv_2 = A_2 v_2 = \frac{dV_2}{dt} \tag{3.6}$$

Esta vazão não provoca imediatamente uma velocidade  $v_1$  para o êmbolo do cilindro 1 mas sim faz com que ocorra um aumento de pressão na câmara 1. Quando esta pressão ultrapassar o valor estabelecido pela equação 3.5, surgirá o deslocamento do cilindro 1 com uma velocidade  $v_1$ .

O princípio físico que ocorre neste circuito pode ser descrito matematicamente por:

$$qv_2 = A_2 v_2 = \frac{V}{\beta} \frac{dp}{dt} + A_1 v_1 \tag{3.7}$$

onde

$\beta$  = Módulo de compressibilidade do fluido [Pa].

Portanto, para se obter a movimentação de um cilindro e, de modo geral, de um atuador seja ele linear ou rotativo, é necessário controlar a vazão de entrada e saída de fluido das câmaras do atuador. E o modo mais comum de fazê-lo é através de válvulas dispostas na tubulação de ligação com o atuador.

### 3.3.1 Expressão do módulo de compressibilidade

Conforme mencionado acima, a compressibilidade está associada à variação da massa específica do fluido em função da pressão a que este está submetido.

No caso de líquidos, não há uma expressão analítica que modele o comportamento da massa específica em um sistema, mas sabe-se que esta é influenciada pela pressão e pela temperatura, ou seja:

$$\rho = \rho(p, T) \tag{3.8}$$

Nesta situação, pode-se obter uma expressão através da expansão em série de Taylor da função 3.8 desprezando-se termos de segunda ordem e superiores, isto é:

$$\rho - \rho_i = \left. \frac{\partial \rho}{\partial p} \right|_{T_i} (p - p_i) + \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_{p_i} (T - T_i) \tag{3.9}$$

sendo que a condição operacional em que  $\rho = \rho_i$ ,  $p = p_i$  e  $T = T_i$  caracteriza o estado inicial do sistema ou, em outras palavras, o ponto de operação.

Empregando-se a equação 3.4, pode-se reescrever a equação 3.9 como:

$$\rho = \rho_i \left[ 1 + \frac{1}{\beta} (p - p_i) - \alpha (T - T_i) \right] \tag{3.10}$$

que corresponde a equação de estado para um líquido, linearizada em um ponto de operação. Os coeficientes presentes nesta equação podem ser obtidos de tabelas em livros especializados ou de catálogos completos sobre fluidos hidráulicos, sendo definidos como:

---


$$\beta = \rho \left. \frac{\partial p}{\partial \rho} \right|_{T_i} = -V_i \left. \frac{\partial p}{\partial V} \right|_{T_i} \tag{3.11}$$


---

definido como o **módulo de elasticidade** ou **módulo de compressibilidade isotérmico** (Bulk

modulus), expresso em Pascal [Pa] e que estabelece a taxa de variação da massa específica em função da variação da pressão em um determinado volume ou, de outro modo, a taxa de variação da pressão que ocorre em função da variação do volume onde o fluido está confinado.

O módulo de elasticidade de um óleo mineral é da ordem de  $14 \times 10^8$  Pa a  $18 \times 10^8$  Pa. A água, que atualmente está voltando a ser empregada em circuitos hidráulicos, possui  $\beta$  da ordem de  $22 \times 10^8$  Pa.

O segundo coeficiente presente na equação 3.11 é o **coeficiente de expansão térmica isobárico**, sendo expresso como:

$$\alpha = \frac{1}{V_i} \left. \frac{\partial V}{\partial T} \right|_{p_i} \quad (3.12)$$

Por sua vez, para os gases considerados ideais, como o ar comprimido, a expressão para a massa específica pode ser extraída da equação de estado:

$$pV = mRT \quad \Rightarrow \quad p = \rho RT \quad (3.13)$$

Substituindo-se a equação 3.13 em 3.11 identifica-se que o valor do módulo de compressibilidade isotérmico para o ar comprimido corresponde ao da pressão a que o ar estiver submetido, isto é:

---


$$\beta = \rho \left. \frac{\partial p}{\partial \rho} \right|_T = \frac{p}{RT_i} RT_i = p \quad (3.14)$$


---

## 4 Referências Bibliográficas

DE NEGRI, V. J. **Estruturação da modelagem de sistemas automáticos e sua aplicação a um banco de testes para sistemas hidráulicos**. 1996. 157 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis

ESPOSITO, Anthony. **Fluid power with applications**. 4th ed. Ohio: Prentice Hall, 1997. 652 p.

FESTO. **Pneumatic electronic tips: informationen über anwendungen der steuerungstechnik**, Festo, 1990. n.78.

FOX, Robert W, MACDONALD, Alan T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 562 p.

HESSE, Stefan. **99 Examples of pneumatic applications**. Germany: Festo, 2000.

LINSINGEN, Irlan von. **Fundamentos de sistemas hidráulicos**. Florianópolis: Edufsc, 2001.

MANNESMANN REXROTH. **Hidráulica, pneumática, star, indramat, lohmann + stolferfont**. São Paulo: Mannesmann Rexroth, 199-.

MERRIT, Herbert E. **Hydraulic control systems**. USA: John Willey, 1967. 358 p.

PAULSON INJECTION MOLDING.<http://www.plasticsnet.com>, 1998.

SHAMES, Irving Herman. **Mecânica dos fluidos: princípios básicos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1973. v.1, 192 p.

IVANTYSYNOVA, M. **Fluid power education – demands of the 21<sup>st</sup> century**. In: PROCEEDINGS OF 1<sup>ST</sup> BRATISLAVIAN FLUID POWER SYMPOSIUM, 1998. Slovakia, Proceedings...Slovakia: Slovak University of Technology in Bratislava, 1998. pp. 05-12.

SULLIVAN, James A. **Fluid power: theory and applications**. 4th ed. USA: Prentice-Hall, 1998. 518p.

VINADÉ, C., PEREIRA, E., DE NEGRI, V. J. **Métodos de projeto para automação pneumática (parte I)**. Revista ABHP, São Paulo, ano 19, n.112, p. 15-18, mai./jun 1999. (1999a)

VINADÉ, C., PEREIRA, E., DE NEGRI, V. J. **Métodos de projeto para automação pneumática (parte II)**. Revista ABHP, São Paulo, ano 19, n.113, p. 15-18, out./nov 1999. (1999b)

---

**Prof. Victor Juliano De Negri, Dr. Eng.**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LABORATÓRIO DE SISTEMAS HIDRÁULICOS E PNEUMÁTICOS – LASHIP

victor@emc.ufsc.br – <http://www.laship.ufsc.br>

Fone: (48) 3721 9396 / (48) 3721 7714 – Fax: (48) 3721 7615

Atualização: Agosto de 2010

**Escritório de Direitos Autorais – N° registro: 328.561 – Livro: 602 – Folha: 221 – Obra não publicada**