

RESUMO

Este artigo mostra, de maneira sintética, os pontos básicos dos trabalhos desenvolvidos pelo autor, no Depto. de Engenharia Mecânica da EPUSP, durante as fases de projeto, construção e testes de um sistema de acionamento e controle hidráulico digital, denominado SAD (Sistema de Acionamento Digital). O sistema proposto foi dividido em quatro subsistemas fundamentais: Interface Eletro-hidráulica, Interface de Controle, Controlador Manual e Programa de Controle.

A montagem e os testes do sistema foram realizados em uma prensa para ensaios de conformação plástica, também projetada e construída no DEM da EPUSP. Os resultados obtidos confirmaram em grande parte as expectativas iniciais. A repetibilidade e a histérese mostraram-se equivalentes às das servo-válvulas e melhores que as das válvulas proporcionais havendo, no entanto, uma clara desvantagem no que diz respeito à resposta em frequência.

1- Eng. Mecânico, Mestre em Engenharia Mecânica pela EPUSP, prof. Assistente do Depto. de Eng. Mecânica da EPUSP.

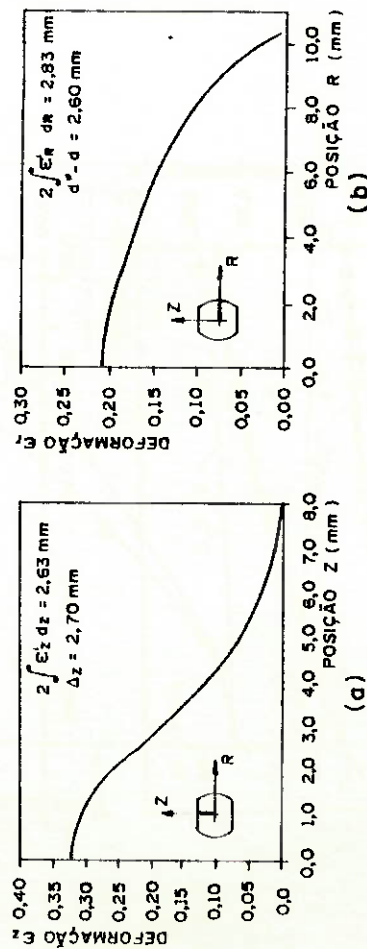


Fig. 5 - Deformações obtidas pelo método fotoelástico para o modelo com atrito C a) deformação ϵ_z ao longo de R , b) deformação ϵ_R ao longo de Z .

Nas últimas décadas, com o irreversível domínio da eletrônica digital, vem sendo possível obter controles mais simples, versáteis e confiáveis de modo que o emprego de controladores analógicos tornou-se cada vez mais raro. A Hidráulica foi, e ainda é, um dos últimos setores a se beneficiar destes desenvolvimentos, justamente pelo fato de suas interfaces (servo-válvulas e válvulas proporcionais) operarem de modo analógico. A solução empregada na maioria dos casos, até hoje, é a utilização de conversores A-D e D-A que mantêm, no entanto, a característica final de controle analógico da interface.

Em função dos três problemas básicos decorrentes do uso de servo-válvulas e válvulas proporcionais, quais sejam, custos, complexidade de instalação e operação e confiabilidade, as mais recentes pesquisas da Engenharia ligadas a controle hidráulico buscam o desenvolvimento de interfaces, e mesmo atuadores, que possam operar de forma inteiramente digital.

Este projeto seguiu esta mesma linha de atuação, embora não procurando desenvolver novas interfaces eletro-hidráulicas mas sim otimizar o uso das já existentes para a operação digital.

2 - O SAD - CARACTERIZAÇÃO E IMPLANTAÇÃO

2.1 - Caracterização

A proposta de projeto e construção do SAD, Sistema de Acionamento Discreto, visa oferecer não só mais uma opção de

Nicola Getschko

Abstract

This paper presents the basic points of the design, construction and tests developed by the author, at EPUSP's Mechanical Eng. Dept., of a new hydraulic power and control system, with digital features, called "DAS" (Digital Actuation System). The system was divided in four subsystems: Electro-Hydraulic Interface, Control Interface, Manual Controller and Control Program.

The system was assembled and tested on a hydraulic press for metal forming research. The results confirmed the initial objectives: repeatability and hysteresis was equivalent to servo-valves and better than proportional valves.

The measured frequency response, as was expected, was much poorer than those of servo-valves and proportional valves.

acionamento e controle hidráulico, mas um sistema mais adequado às exigências tecnológicas atuais e de baixo custo.

A idéia central é substituir as atuais válvulas proporcionais e servo-válvulas, que operam de forma totalmente analógica tanto para o sinal de entrada como para o de saída, por interfaces mais simples, confiáveis e baratas sem, no entanto, prejuízo do desempenho e precisão de funcionamento.

O projeto SAD procurou atingir esta meta, de forma diversa, ou seja, não através do projeto e concepção de uma nova válvula hidráulica digital, mas otimizando o uso de um tipo de válvula já existente com estas características, que é a válvula solenóide direcional. A existência de limitações decorrentes do uso de um componente não projetado exclusivamente para este fim, é óbvia. Deve-se lembrar, todavia, que a válvula é apenas uma parte, embora fundamental, do sistema de controle sendo que o circuito eletro-eletrônico de acionamento e a própria estratégia de controle, desempenham papéis igualmente importantes.

O princípio de funcionamento do SAD é bastante simples. Através da comutação, em alta frequência, de válvulas solenóide direcionais pretende-se controlar a vazão em um circuito hidráulico. Na verdade, está se buscando a discretização do fluxo de óleo, analogamente ao que ocorre com a corrente em um motor-de-passo elétrico. O tempo em que a válvula permanece aberta, juntamente com a vazão instantânea do circuito, definirão o volume de óleo, a ser enviado ao atuador (circuito), em cada pulso.

Portanto, a estratégia de controle passa a ser agora a de definir a frequência dos pulsos e/ou sua duração, para obter a resposta desejada do atuador. Uma preocupação constante de todo o

projetista é que a hidráulica sendo, basicamente, não linear acarreta uma série de complicações quando se deseja projetar sistemas de controle, ou prever respostas do equipamento para uma dada atuação. O SAD não desconsidera estas características, mas procura uma forma de contornar algumas dificuldades.

De fato, ao se discretizar o fluxo de óleo, todo o comportamento não linear fica restrito ao intervalo de abertura da válvula o que, como já foi dito anteriormente, é tratado de forma integral na estratégia de controle. Assim, o que importa ao SAD, é que em um dado intervalo de tempo, tem-se um certo volume de óleo, a uma dada pressão, fornecido ao sistema de forma invariável. Caso por exemplo, a frequência de um dado pulso seja duplicada, a vazão aparente do circuito também o será, estabelecendo-se assim a "linearização" do sistema.

O SAD é composto basicamente por quatro subsistemas:

Interface eletro-hidráulica
Interface de controle
Controlador Manual
Programa de controle

a) Interface eletro-hidráulica

A interface eletro-hidráulica é composta por quatro válvulas solenóide direcionais, de 4 vias e 3 posições, ligadas em paralelo, que operam em alta frequência (para padrões hidráulicos) entre os estados de abertura e fechamento total. O objetivo da li-

ção em paralelo é permitir melhorar a resposta dinâmica global do sistema, através da operação seqüencial das válvulas. Pode-se por exemplo, desta forma, quadruplicar a frequência aparente de acionamento do sistema, aumentando a faixa de controle. Por outro lado, com a operação simultânea é possível quadruplicar a vazão para uma dada frequência, ou mesmo operar com uma ou mais válvulas totalmente abertas ou fechadas, deixando o controle apenas com as restantes.

Um outro importante benefício do uso de válvulas em paralelo, é o aumento da confiabilidade do sistema. Uma falha total, e conseqüente ausência de controle, somente será possível caso ocorra uma falha (simultânea!) nas quatro válvulas. Este aspecto é ainda mais ressaltado, quando se lembra que as válvulas solenoides de direcionais contam com um acionamento manual de emergência, ao contrário do que acontece com as servo-válvulas, que não dispõem de nenhum recurso similar.

b) Interface de Controle

A Interface de Controle é um circuito eletrônico , projetado para estabelecer a ligação entre o sinal de controle e o sinal de acionamento dos solenoides. Há a possibilidade de se utilizar dois sinais de controle de fontes distintas: a partir do Controlador Manual e a partir da interface paralela de um microcomputador (do tipo PC), onde está instalado o Programa de Contro-

le. Uma vez recebido este sinal, ele é amplificado, em um estágio de potência para torná-lo adequado aos solenóides das válvulas. A operação se dá em quatro canais, sendo incluído mais um canal de potência, com saída CC constante, para acionamento de uma outra válvula solenóide direcional, utilizada para manobras no circuito hidráulico de teste. É importante notar que o sinal de controle não sofrerá nenhum tipo de alteração em sua característica digital.

c) Controlador Manual

O Controlador Manual é um circuito eletrônico, projetado para gerar um sinal digital de controle na forma de pulso "quadrado", com frequência e patamares ajustáveis. Sua função principal é a de auxiliar durante os testes dinâmicos das válvulas solenóides, e testes iniciais de todo o sistema. Através da variação da frequência dos patamares dos pulsos, é possível determinar-se os valores limites de operação, utilizados posteriormente como parâmetros no Programa de Controle. Por outro lado ele é um importante recurso auxiliar no controle global, principalmente durante a fase inicial de definição do Programa de Controle, exatamente por permitir o controle manual das variáveis hidráulicas.

d) Programa de Controle

O Programa de Controle tem como objetivo gerar sinais de

controle que permitam testar o desempenho do SAD e, de certa forma, de todo o circuito hidráulico do equipamento. São geradas três funções diferentes: senoidal, rampa e sequência definida de pulsos. Cada uma delas tem seus parâmetros ajustáveis (amplitude, período, número de pulsos, etc) de modo a permitir a maior versatilidade possível de operação. O programa será configurado de tal forma que permita ao operador, mesmo não totalmente familiarizado com o mesmo, definir a função de controle através da resposta a uma série de perguntas, mostradas na tela do micro-computador.

O arranjo esquemático destes subsistemas e suas interações, são mostrados na figura 1

2.2 - A Implantação do SAD - Circuito Hidráulico

O SAD foi implantado como sistema de comando e acionamento de uma prensa para ensaios de conformação plástica, com capacidades máximas de 49 kN de carga e 50 mm/s de velocidade.

O circuito hidráulico foi projetado para atender às seguintes características:

- acionamento reversível do cilindro pelo acumulador - ciclo de trabalho
- acionamento auxiliar reversível do cilindro pela bomba - ciclo de posicionamento
- regulação da pressão máxima de enchimento

- regulação da vazão na(s) válvula(s) de controle

A figura 2 mostra o esquema do circuito hidráulico, adotando uma configuração do tipo "meter-in".

O uso de um acumulador hidráulico como fonte principal de energia, visou aumentar a eficiência global do sistema, aproveitando os tempos mortos, entre os ensaios, possibilitando uma sensível redução no tamanho da unidade hidráulica além dos demais benefícios decorrentes do uso de acumuladores.

2.3 - Aspectos Dinâmicos do Circuito.

Uma vez que impôs-se a um circuito hidráulico um regime de trabalho, em que os pulsos de pressão deixavam de ocorrer esporadicamente, para tornarem-se parte da estratégia de controle, foi imprescindível estimar qual a frequência natural do sistema e qual o valor máximo.

No primeiro caso chegou-se a um valor de 41,4 Hz, o que se situou em uma faixa seguramente distante da frequência de funcionamento do SAD. No segundo caso, a sobrepressão máxima calculada e medida foi de 5 MPa, o que é suportado com boa margem de segurança pelo sistema.

3- SISTEMA ELETRÔNICO DE CONTROLE

3.1-Interface de Controle e Controlador Manual

O controle do equipamento, conforme já discutido, é em malha aberta, já que se trata de processo digital. Por se tratar de processo digital, foram examinadas técnicas usuais empregadas na modulação de sinais analógicos por pulsos discretos ("PWM", "PPM"), sendo escolhida a do tipo "PPM" (Pulse Position Modulation), considerando os seguintes pontos:

- o PPM pode converter diretamente fluxo de óleo em pulsos de valor constante e adequadamente espaçados. Para vazões baixas, teremos os pulsos mais distanciados no tempo. À medida que a vazão cresce, os pulsos vão se aproximando até que, justapondo-se, provoquem vazão nominal da válvula.

- o PPM possui um comportamento fortemente não linear na região em que a válvula se aproxima da vazão nominal. Neste ponto, pelo fato dos pulsos se tornarem seguidamente mais próximos, atinge-se uma situação em que ocorre o não fechamento total da válvula. Com o aumento do número de pulsos, a válvula tenderá a permanecer parcialmente e, a seguir, permanentemente aberta, o que causará uma não linearidade em seu comportamento.

A regulação da vazão, próxima à vazão nominal, não constituiu problema nem o objetivo primeiro do controle. O controle estreito de vazões baixas, entretanto, definirá a resolução e a re-

petibilidade do movimento do cilindro. Partindo-se do objetivo de modelar com precisão o comportamento do sistema hidráulico principalmente em baixas vazões e deslocamentos, e considerando-se ainda que nesta região o PPM possui um comportamento nitidamente linear, optou-se na definitiva implementação pelo projeto e construção de circuito de controle utilizando-se o PPM.

O circuito de controle completo engloba um microcomputador tipo IBM-PC, onde é executado o programa gerador de trajetórias, interface entre o microcomputador e o circuito propriamente dito, módulo de controle manual, permitindo atuação direta sem intervenção do microcomputador e, finalmente, a seção de potência, que gera o sinal de atuação dos solenóides das válvulas hidráulicas.

3.2-Implantação do controle PPM

O circuito montado constitui-se de quatro módulos simples:

- a interface digital com o microcomputador
- módulo de controle manual
- o módulo gerador de pulsos
- o módulo atuador de potência

Os dois últimos são comuns tanto à Interface de Controle como ao Controlador Manual.

A alimentação dos módulos lógicos e do módulo atuador de potência é fornecida por reguladores independentes, de forma a minimizar efeitos de interferência. O circuito conta também com fonte de alimentação incorporada.

3.3) Características Operacionais

Na versão em uso, a repetição máxima de pulsos, em função dos testes realizados, foi fixada em 20 Hz. Ou seja, os pulsos aparecem com distanciamento mínimo entre suas bordas de subida de 50 ms. Desta forma garante-se que as válvulas têm tempo para um fechamento completo, mantendo-se a resposta aos pulsos completamente linear.

4- PROGRAMA DE CONTROLE

O sistema montado é controlado em tempo real ("on-line") por um microcomputador tipo IBM-PC. Para a consecução do controle das válvulas-solenóide desenvolveu-se um programa de computador adequado.

Alguns pontos importantes foram considerados no projeto

e desenvolvimento do "software" PULSOLE:

- O programa desenvolvido (PULSOLE) permite o controle de até quatro válvulas solenóide, em tempo real.
- Foi utilizado o modelamento tipo PPM, de sorte que as formas de onda escolhidas foram obtidas por meio do cálculo do espalhamento correto de pulsos nas válvulas hidráulicas.
- O sinal de controle gerado é uma sequência de pulsos, com frequência entre "zero" e 20 Hz.
- No caso de mais de uma válvula para um mesmo movimento, o acionamento pode ser sequencial, de modo a multiplicar a frequência dos pulsos hidráulicos.
- É possível acionar-se qualquer número de válvulas (entre 1 e 3) tanto para a subida quanto para a descida dos movimentos periódicos, e entre 1 a 4 nos movimentos aperiódicos.
- O PULSOLE implementa trajetórias que permitem conclusões acerca do bom funcionamento do sistema total. Para isso foram escolhidas três trajetórias básicas: duas periódicas e uma aperiódica (senóide, "dente-de-serra" e sequência de pulsos).

5-TESTES DOS COMPONENTES E DO EQUIPAMENTO

5.1 - Determinação do Deslocamento por Pulso e da Repetibilidade

Os dois objetivos deste ensaio foram determinar qual o real deslocamento da haste para um pulso e, consequentemente, ve-

rificar qual a repetibilidade do processo de posicionamento.

Para tanto, foi adotado um procedimento bastante simples, que consistiu em, utilizando a função aperiódica - "passos discretos aperiódicos" - do programa de controle, estipular um certo número de passos e verificar qual o deslocamento correspondente da haste do cilindro.

As posições inicial e final foram determinadas utilizando-se um voltímetro digital. Após cada série de pulsos, a haste retornava, por meio de comando manual até sua origem para a execução mais um ensaio. A pressão inicial de cada teste foi de 8,0 MPa, sendo utilizada uma sequência de 100 pulsos por válvula.

Os resultados obtidos foram os seguintes:

- repetibilidade $\Rightarrow R_p = 1,5 \%$
- deslocamento da haste para um pulso:
 - $\Rightarrow X_h = 0,16 \text{ mm (subida)}$
 - $\Rightarrow X_h' = 0,19 \text{ mm (descida)}$

A diferença entre os valores do deslocamento por pulso na subida e na descida, decorre da diferença das áreas úteis do êmbolo, em razão da existência da haste em apenas um dos lados.

- Ensaio de Deslocamento tipo "Rampa" e "Senoide"

Os testes de deslocamento definido foram utilizados para a verificação das possibilidades de variação da velocidade, a suavidade da trajetória ou a ausência de descontinuidades, a verifi-

cação da histerese do sistema global e a eficácia do Programa de Controle na digitalização de curvas.

Conseguiu-se uma variação contínua da velocidade entre 0 e 12,14 mm/s, acima, inclusive, das especificações iniciais do projeto inicial da prensa. Até onde foi possível verificar, as curvas da trajetória não mostraram qualquer descontinuidade ("saltos") relevante, ainda mais considerando-se o fim a que se destina o equipamento.

O aspecto histerese e algo controverso já que o valor medido (2,8% ou 4,9 "pulsos") refere-se ao sistema global e não ao SAD, uma vez que a definição convencional desta grandeza não se aplica, facilmente, a um processo digital. Desta forma, não há como confrontar os valores obtidos com o de sistema equivalentes (válvulas proporcionais e servo-válvulas) pois cada um deles trata de características diversas.

Urante os ensaios foi verificada a variação da vazão na válvula em função da queda de pressão no acumulador hidráulico, causada pela diminuição do volume de óleo em seu interior. Para evitar que seus efeitos distorcessem os resultados obtidos, foi feita, quando necessária, uma correção dos valores levando em conta este fenômeno.

Caso seja mantida a atual configuração do sistema hidráulico, no futuro, esta correção poderá ser feita automaticamente pelo Programa de Controle, através da alteração da frequência instantânea de pulsos, em função do deslocamento já efetuado.

É importante frisar que o uso do acumulador hidráulico, como fonte principal de energia para o acionamento, não faz parte do projeto SAD, sendo apenas uma característica conjuntural rela-

6-CONCLUSÕES

As principais conclusões do trabalho são:

- O SAG apresentou repetibilidade e resolução similares e, em alguns casos, até superiores aos sistemas que empregam válvulas proporcionais e servo-válvulas. Fica clara a total viabilidade de seu uso em grande parte dos processos de posicionamento, em equipamentos industriais.

- Foi possível obter uma variação linear e contínua da velocidade, empregando uma simples válvula solenoide direcional, superando as especificações iniciais do projeto. Ao contrário do que ocorre com servo-válvulas e válvulas proporcionais, não houve qualquer problema na operação em baixas velocidades.

- O sistema mostrou alta confiabilidade, não apresentando qualquer falha de ordem elétrica ou hidráulica que compromettesse seu funcionamento ou integridade, durante todo o período de testes.

- Há uma evidente desvantagem do SAG, frente às servo-válvulas, quando se exige uma trajetória cíclica de alta frequência (em termos hidráulicos). As frequências obtidas são muito inferiores, não recomendando seu uso, na configuração atual, para

aplicações em que são necessárias variações rápidas e contínuas da velocidade.

- O uso do Controlador Manual, além de extremamente importante, principalmente, para os testes das válvulas solenoide, mostrou-se bastante útil e adequado, como controle auxiliar, para eventuais implementações industriais do SAG e, também, como controle principal em aplicações que dispensem o controle em tempo real pelo microcomputador.

- As válvulas solenoide empregadas, são um fator altamente limitante para a melhoria das características do SAG, em função dos grandes tempos de abertura e fechamento apresentados. Em pesquisas similares, no exterior, válvulas especialmente projetadas para operação digital, apresentam tempos drasticamente menores, próximos a 1 ms !

- Houve uma grande diferença entre as especificações dinâmicas nominais das válvulas solenoide, e os valores medidos nos testes. De uma forma geral, as características medidas foram superiores às especificadas, de modo que não houve qualquer frustração das expectativas iniciais.

Um ponto bastante importante, quando se analisam as características do SAG comparativamente com outros sistemas de controle hidráulico, é que os dados obtidos pelos seus ensaios são referentes a todo o equipamento, refletindo uma condição real de uso. Por outro lado, as especificações nominais de servo-válvulas

as válvulas proporcionais, referam-se apenas a condições ideais, onde se ensaiado apenas o componente e, muitas vezes, com vazão nula.

Embora o sistema montado permita uma série de refinamentos e otimizações que levariam a uma sensível melhora em suas características, de maneira geral, o SAD mostrou-se um sistema plenamente viável, talvez não como um substituto total das servoválvulas e válvulas proporcionais, mas como mais uma opção de controle hidráulico que, certamente, pode suprir, de forma simples e econômica, um parcela considerável das necessidades do dia-a-dia da indústria nacional.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Beercheck, C., R. - Controlling Hydraulics with Electronics, Machine Design, vol. 53, nº 2, jan. 1981, pp. 57-60.
- 2) Beercheck, C., R. - New Options for Hydraulic System Control, Machine Design, vol. 56, nº 6, mar., 1984, pp. 77-81.
- 3) Blackburn, F., J. et alii - Fluid Power Control, MIT Press, Cambridge, 1960.
- 4) Carlson, B., A. - Communication Systems, MacGraw-Hill, Nova Iorque, 2ª ed., 1975.
- 5) Getschko, N. - Projeto e Construção de um Sistema de Acionamento e Controle Hidráulico Digital, EPU SP, São Paulo, 1989.
- 6) Guenther, R. - Saving Energy with Hydraulic Accumulators, Machine Design, vol. 54, nº 14, julho, 1982, pp. 78-83.
- 7) Guillon, M. - Hydraulic Servo-Systems - Analysis and Design, Butterworths Press, Londres, 1969.

- 8) Henke, R. - Proportional Hydraulic Valves offer Power, Flexibility, Control Engineering, vol. 17, nº 4, abril, 1981, pp. 68-71.
- 9) Mansfield, G. - Fast Switching Ball Valves as Digital Control Elements for an Electro-hydraulic Servo Actuator, Ann. of Fluid Power Symposium - BHRA, Cranfield, abril, 1981, pp. 335-349.
- 10) Merritt, H., E. - Hydraulic Control Systems, John Wiley & Sons, Nova Iorque, 1967.
- 11) Millmam, J. Taub, H. - Pulse Digital and Switching Wave Forms, Mac-Graw Hill Kogakusha, Tóquio, 1965.
- 12) Nery, F., A., C. et alii - Máquina para Ensaios de Forjamento e Estampagem, Anais do 41º Congresso Anual da ABM, São Paulo, 1986.
- 13) Thoma, J., U. - Modern Oilhydraulic Engineering, Trade & Technical Press, Maryland, 1970.
- 14) Rich, F., S. - Accumulator for Simple, Cost-Effective Control, Machine Design, vol. 55, nº 9, abril, 1983, pp. 66-70.
- 15) Yeaple, F. - Hydraulics valves and the Micro, Design Engineering, vol. 37, maio, 1982, pp. 29-33.
- 16) Watton, J. - The generalized Response of Servo-valve Controlled, Single-Rod, Linear Actuator and the Influence of Transition Line Dynamics, Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control, vol. 106, junho, 1984, pp. 157-162.
- 17) Zuffo, J., A. - Subsistemas Digitais e Circuitos de Pulso, Edgard Blücher, São Paulo, 1974.

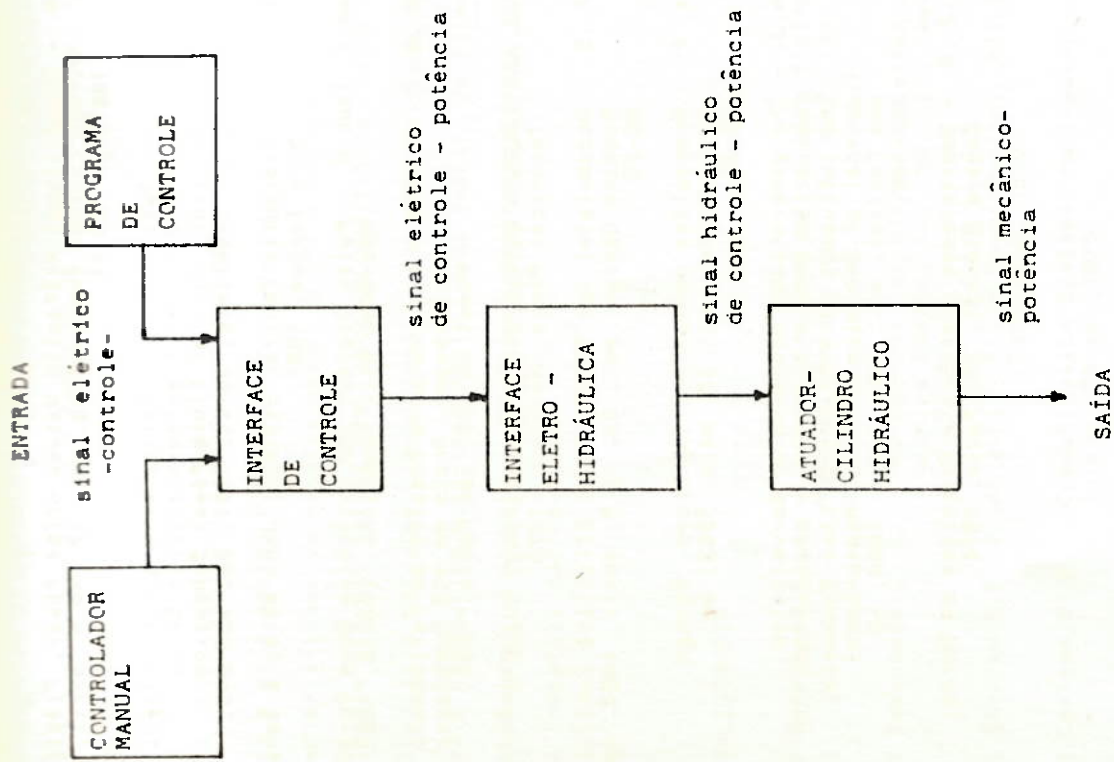


Figura 1 - O SAD - Subsistemas

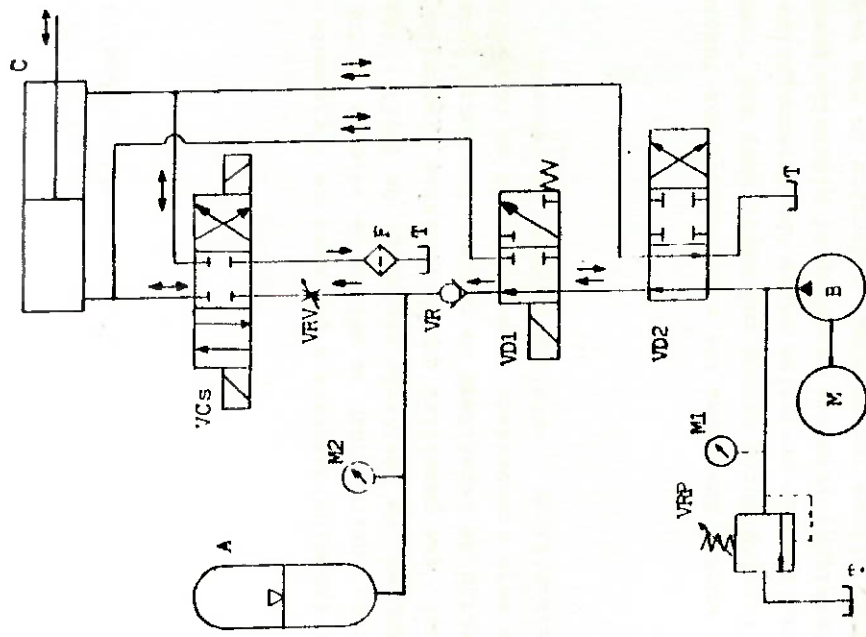


Figura 2 - Circuito hidráulico básico do SAD