

# ANÁLISE DO CHAVEAMENTO ENTRE VÁLVULAS PARA ATUADOR HIDRÁULICO DIGITAL (DHA)

IVAN J. MANTOVANI<sup>1</sup>, HENRI C. BELAN<sup>2</sup>, VICTOR J. DE NEGRI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lab. de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos, Dep. de Eng. Mecânica, Univ. Fed. de Santa Catarina 88040-900, Trindade, Florianópolis - SC, Brasil.

<sup>2</sup>Área de Mecânica, Dep. de Ensino, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Tubarão 88704-296, Dehon, Tubarão - SC, Brasil

E-mails: ivan.mantovani8@gmail.com, henri@ifsc.edu.br, victor.de.negri@ufsc.br

**Abstract**— The low relation between weight/power and the fast dynamics are characteristics that make the fluid power be a technology option for a lot of applications. In counterpart, the energy efficiency is relatively low, mainly by the control of the hydraulic power of resistive way by control orifices. As an alternative to increase the efficiency of these systems, digital hydraulics has been showing great growth by researchers, with results of reduction of dissipative effects that reach 90%. However, the pressure peaks occurring during consecutive valve switching, which is a characteristic of these systems, still present a challenge for the smoothness of actuator movement. In this context, this work investigates, based on experimental results, the smoothness of digital hydraulics switchings, pointing to the desynchronization between valve closing and opening actions as the main problem. In addition, a new method is proposed to determine the digital valves response, since this is the problematic variable so that an adequate synchronization does not occur in the switching.

**Keywords**— Fluid Power Digital Switching, Smoothing on Switching, Digital Valves.

**Resumo**— A baixa relação peso/potência e rápida resposta dinâmica são características que fazem com que a hidráulica de potência seja opção tecnológica para diversas aplicações. Em contrapartida, a eficiência energética é relativamente baixa, principalmente pelo controle da potência hidráulica de maneira resistiva por orifícios de controle. Como alternativa para aumentar a eficiência destes sistemas, a hidráulica digital vem demonstrando um grande crescimento por pesquisadores, com resultados de redução dos efeitos dissipativos que chegam a 90%. Todavia, os picos de pressão ocorridos durante os consecutivos chaveamentos de válvulas, característicos nestes sistemas, ainda apresentam um desafio para a suavidade da movimentação do atuador. Neste contexto, este trabalho investiga, com base em resultados experimentais, o problema da falta de suavização dos chaveamentos da hidráulica digital, apontando a dessincronização entre as ações de fechamento e abertura da válvula como o principal problema. Além disso, propõe-se um novo método para determinação da resposta das válvulas digitais, pois esta é a variável problemática para que não ocorra uma sincronia adequada no chaveamento.

**Palavras-chave**— Hidráulica Digital, Chaveamento Digital, Suavização no Chaveamento, Válvulas Digitais.

## 1 Introdução

Indiscutivelmente, sistemas de atuação com hidráulica de potência dominam diversos campos de aplicações, isso, principalmente por suas características de baixa relação peso/potência e rápida resposta dinâmica (Tanaka & Sakama, 2013). Porém, a eficiência total em uma aplicação típica (Exemplo de aplicação típica em Pereira-Dias et al., 2014), com uso de válvulas proporcionais, é muito baixa, podendo chegar até menos de 5 % (Virvalo & Vilenius, 2000). A baixa eficiência e o aumento no número de pesquisas em atuadores eletromecânicos, fez com que ocorresse surgimento de muitas alternativas elétricas para substituição de sistema hidráulicos, como, por exemplo, o conceito *More Electric Aircraft* – MEA no setor de aviação como apresentado em Naayagi (2013).

Uma linha de pesquisa da hidráulica de potência, a hidráulica digital, obteve uma ascensão no número de pesquisas na comunidade acadêmica internacional, principalmente por sua característica em termos de eficiência energética (Henri et al, 2014). Comparado aos sistemas com válvulas proporcionais, os sistemas hidráulicos digitais apresentam grandes vantagens,

por exemplo, alta eficiência, robustez e elevada capacidade de padronização de componentes (Schepers, et al., 2012). Como exemplo de pesquisas promissoras, citam-se Linjama et al. (2009), Dell'Amico et al. (2013), (Belan et al., 2015), (Belan et al., 2016) e Huova et al. (2017). Para uma visão geral sobre as pesquisas em andamento em hidráulica digital, sugere-se a leitura de Linjama (2011) e Belan et al. (2014).

Instigados pelos resultados apresentados por pesquisadores da área, o Laboratório de Sistema Hidráulicos e Pneumáticos (LASHIP), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em parceria com a empresa Svenska Aeroplan AB (SAAB) com sede na Suécia e a Divisão de Sistemas Mecatrônicos e de Fluidos (FLUMES), da Universidade de Linköping, também sediada na Suécia, firmaram uma parceria para o desenvolvimento de uma concepção com hidráulica digital para controle de superfícies primárias de aeronaves.

Está parceria tem como base o trabalho de doutorado de Belan (2018), nele foi apresentado uma concepção de sistema de atuação digital para aplicação em aviação, nomeado de *Digital Hydraulic Actuator* - DHA. Como principais objetivos do trabalho foi desenvolvimento de um sistema hidráulico mais

eficiente que os atuais, mantendo o desempenho exigido pela aplicação. Como resultado foi projetado e construído um protótipo que demonstrou um potencial de redução de até 90% da dissipação energética, comparado aos sistemas com servoválvulas utilizados atualmente. Como aspecto passível de aprimoramento, a pesquisa apontou um problema intrínseco nos sistemas digitais, que é ruído ocasionado pela pressão durante os chaveamentos das válvulas digitais.

Estes picos característicos dos DHAs têm como principal agente degradador a diacronia<sup>1</sup> no chaveamento de pressões, a qual é consequência da incerteza, na ordem de milissegundos, da resposta das válvulas digitais (Hansen & Pedersen, 2016). Esta incerteza se dá por três fatores, sendo eles os dados fornecidos pelos fabricantes são valores médios, os sistemas digitais normalmente usam aceleradores eletrônicos que alteram o tempo de resposta nominal e, por fim, o comportamento das válvulas podem variar com o ciclo de vida e condições do ambiente a que estão inseridas.

Atualmente, para o levantamento do tempo de resposta das válvulas é aplicado o método apresentado por Breidi et al. (2015), onde é realizado um experimento para cada válvula separadamente. Para obtenção de resultados mais confiáveis, é indicado que os ensaios sejam realizados em manifold específico, o que torna-se inviável em um produto comercializável. Isto, pois há a necessidade de testar cada válvula separadamente e não só realizar este procedimento apenas uma vez e sim periodicamente, com a necessidade de desmontar o equipamento a cada experimento.

Neste contexto, este trabalho objetiva o desenvolvimento de um método para determinar o tempo de “Atraso” a ser adotado no acionamento de cada válvula digital sem interferir mecanicamente no sistema. Nestes termos, pretende-se coletar informações para dar suporte para o desenvolvimento de uma ferramenta para suavizar o chaveamento de sistemas digitais através da sincronia do mesmo.

## 2 Sistema DHA em estudo

O sistema em estudo foi desenvolvido por Belan (2018), e consiste em uma concepção que se classifica como controle secundário para atuadores lineares. O controle secundário é uma terminologia que indica que o controle da potência hidráulica é realizado pela unidade de atuação e não por válvulas intermediárias (ex.: servoválvulas). No conceito proposto, são utilizados um atuador multicâmaras<sup>2</sup> e níveis diferentes de pressões. Neste sistema o conjunto de válvulas digitais pode conectar cada nível de pressão a qualquer uma das câmaras do atuador, gerando assim, diversos níveis discretos de força na haste do atuador.

Na Figura 1 é apresentado o diagrama do circuito hidráulico simplificado da concepção em estudo.

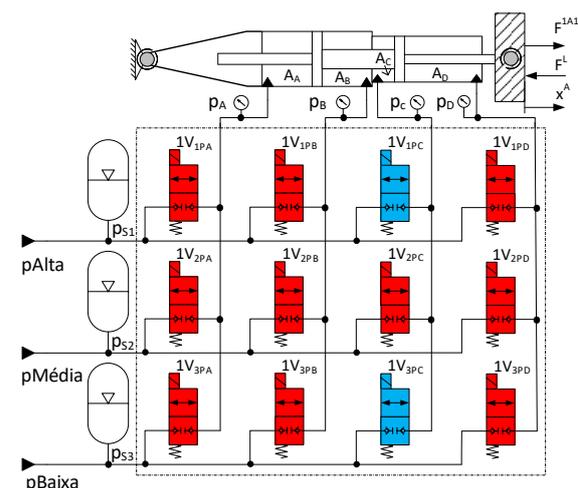


Figura 1<sup>3</sup>. Diagrama hidráulico simplificado do DHA em estudo (Belan et al., 2016).

Com base na Figura 1, é possível visualizar o uso de um atuador multicâmaras com quatro áreas diferentes e três níveis de pressões. Nesta configuração, o sistema tem a possibilidade de exercer 81 níveis discretos de forças. Na Equação 1 é apresentado como é calculado cada nível de força exercido pelo sistema.

$$F^{IAI} = A_A p_A - A_B p_B + A_C p_C - A_D p_D \quad (1)$$

onde  $F^{IAI}$  é a força hidráulica,  $A$  é a área da câmara e  $p$  é o nível de pressão selecionado para câmara e os índices  $A, B, C$  e  $D$  indicam a câmara que a variável  $A$  e  $p$  é relacionada.

Com isso, o controle de posição neste sistema ocorre pela interação do meio ( $F^L$ ) com o atuador ( $F^{IAI}$ ), além é claro, também das forças envolvidas intrinsecamente em um atuador hidráulico, como o atrito. De maneira simplificada, quando as forças atuantes na haste do atuador entram em equilíbrio o atuador não tem aceleração, já quando a  $F^{IAI}$ , que é determinada pela Equação 1, for maior que  $F^L$  o atuador se movimenta com aceleração positiva, e quando  $F^{IAI}$  for menor que  $F^L$  o movimento é no sentido negativo.

### 2.1 Acelerador eletrônico

Como mencionado na introdução, os sistemas hidráulicos digitais normalmente utilizam aceleradores eletrônicos para o acionamento das válvulas digitais, permitindo uma maior quantidade de chaveamentos para o mesmo período de tempo.

No sistema em estudo foi elaborado um amplificador para a abertura das válvulas, o qual é apresentado detalhadamente em Bregalda et al. (2016). O método utilizado para acelerar a abertura da válvula

<sup>1</sup> Antônimo de sincronia.

<sup>2</sup> Atuador com mais de duas câmaras e com áreas distintas.

<sup>3</sup> As indicações em azul e vermelho serão utilizadas no decorrer do artigo.

foi o *Peak and Hold* (Pico e Manter), que consiste em exercer um pico de tensão maior que a nominal por um pequeno tempo, em seguida estabilizar na tensão nominal do solenoide.

No trabalho de Bregalda et al. (2016) foi utilizado a mesma estratégia adotada por Breidi et al. (2015) para determinar o tempo de abertura e fechamento das válvulas. Considerando a dificuldade de medição direta da movimentação do carretel da válvula, a técnica consiste em inferir sobre os tempos da movimentação do obturador (carretel) por meio do diferencial das pressões de entrada e saída. Para minimizar o efeito do erro, cada válvula deve ser avaliada separadamente, posicionando os sensores de pressão o mais próximo possível das portas de entrada e saída da válvula.

Com o acelerador eletrônico o tempo de abertura total das válvulas deste sistema foi reduzido de 19 ms para 4 ms aproximadamente. Com este equipamento, as válvulas digitais apresentaram tempos de abertura relativamente próximos (variação inferior à 1 ms). O tempo de fechamento, por sua vez, ficou em torno de 44 ms, com variação de  $\pm 6$  ms de uma válvula para outra. No caso de fechamento, destaca-se que não há atuação do acelerador e as válvulas operam de acordo com as especificações de fabricação.

### 3 Características do chaveamento digital

Na Figura 2 é apresentado um esquema de como um chaveamento de pressões em uma câmara genérica ocorre, com as variáveis envolvidas.

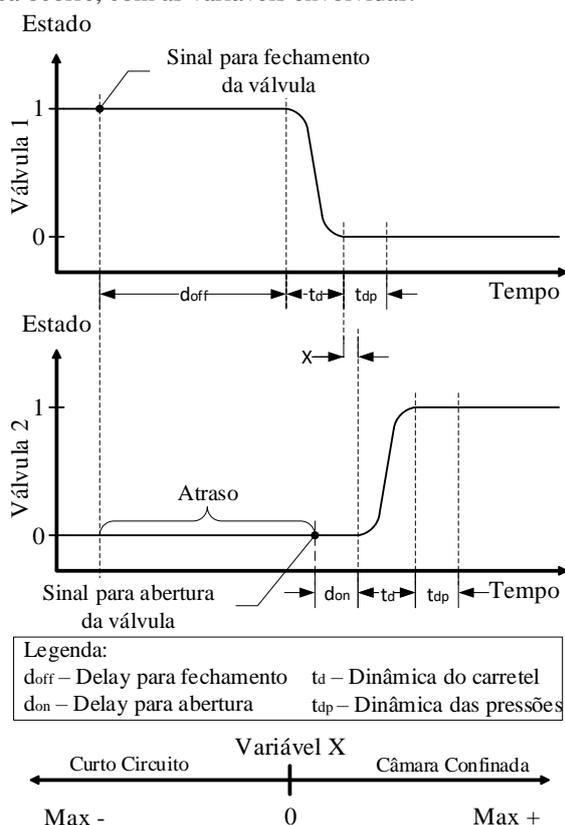


Figura 2. Variáveis envolvidas em um chaveamento.

Neste exemplo, para que seja modificada a pressão na câmara é necessário fechar a “Válvula 1” (pressão anterior) e, posteriormente, abrir a “Válvula 2” (pressão futura).

O termo “curto circuito” se refere a um período em que dois níveis de pressão ficam conectados ao mesmo tempo, gerando perdas de energia por fuga da linha de pressão mais alta para a linha de pressão mais baixa.

O termo “câmara confinada” se refere a um período em que todas as válvulas de uma câmara estão totalmente fechadas. Nos casos em que o cilindro está em movimento, o confinamento gera alteração de pressão na câmara que são transformados em movimentos indesejados na haste do atuador e, consequentemente, diminuindo o desempenho do sistema.

Com o objetivo de obter o máximo rendimento energético com a mínima perturbação por chaveamentos, é necessário que uma e somente uma das linhas de pressão esteja conectada a cada câmara do atuador. Em outras palavras, não deve ocorrer situações onde as duas válvulas estejam abertas (curto circuito) ou fechadas (confinamento) ao mesmo tempo.

Quando a especificação descrita acima é atendida durante um chaveamento, este é considerado como sincronizado. Conforme a Figura 2, para que isto ocorra, a variável  $X$  deve ser igual a 0, o que é alcançado com a aplicação de um “Atraso” no envio de sinal de abertura para a “Válvula 2”. Ainda em referência à Figura 2, o “Atraso” para obtenção de  $X = 0$  deve ser igual ao tempo de fechamento completo da “Válvula 1” ( $d_{off} + t_d$ ) reduzido do “Delay para abertura” da “Válvula 2” ( $d_{on}$ ), ou seja, apresenta um valor dependente do comportamento das duas válvulas.

Desta forma, a variação no tempo de fechamento das válvulas insere uma incerteza na variável  $X$ , podendo provocar um chaveamento dessincronizado quando tratado este tempo como constante. Neste âmbito, a precisão na determinação dos “Atrasos” (Figura 2) que devem ser aplicados em cada chaveamento é fundamental para sua sincronia. Porém, a variável tempo apresenta uma aleatoriedade devido às condições operacionais e ao ciclo de vida dos componentes, conforme observado em experimentos práticos. Sendo assim, seriam necessários testes periódicos e individuais em cada válvula, tornando este método de Breidi et al. (2015) inaplicável em uma situação prática.

### 4 Proposta de análise e experimentação

Objetivando uma suavização no chaveamento sem perdas energéticas, a determinação do valor de “Atraso” (Figura 2) aplicado às válvulas, precisamente, tornam-se imprescindível. Tendo em vista a dificuldade na aplicabilidade do método apresentado na seção 3, é apresentado aqui um método alternativo para a determinação diretamente do tempo de “Atra-

so”, dispendo como entradas as variáveis de estados mensuráveis do sistema, no caso, as pressões.

Visto isto, e também pretendendo que com o método alternativo não exija a retirada das válvulas do sistema para a realização dos experimentos, foi avaliado que o chaveamento apresentado na Figura 2 pode ser observado com o confinamento de três câmaras e o uso de apenas dois níveis de pressão no sistema em estudo, ou seja, com as válvulas da Figura 1 em vermelho desligadas e as válvulas em azul sendo chaveadas. Desta forma, alterando o valor da variável “Atraso” em um experimento com sucessivas amostras, é possível observar comportamentos do sistema (pressões envolvidas no chaveamento) desde a situação de máximo curto circuito até uma situação de câmara confinada, além de avaliar situações de transição. Assim encontrando padrões comportamentais nas pressões que indicariam que o chaveamento está ocorrendo de maneira sincronizada.

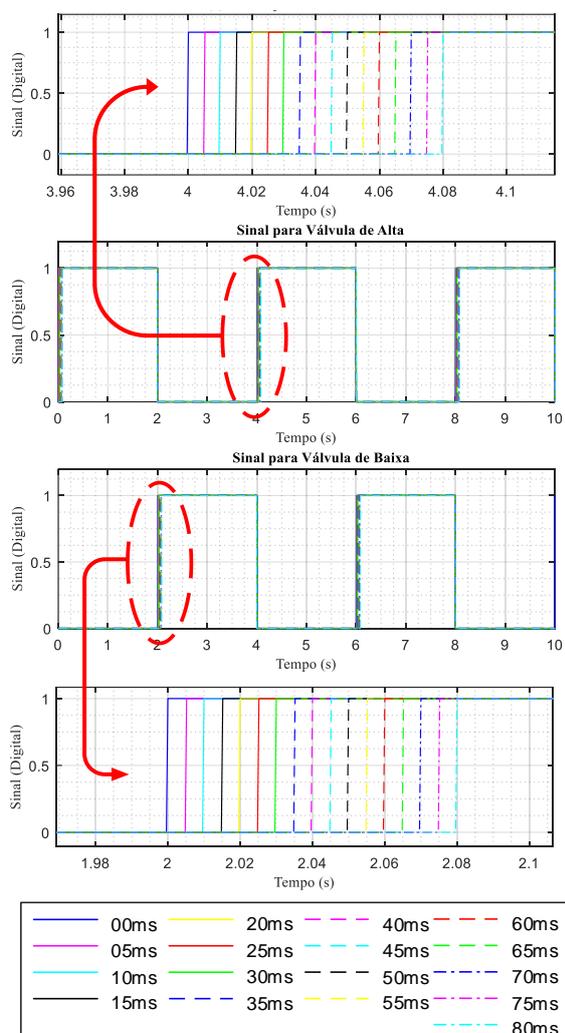


Figura 3. Gráfico das entradas de sinais para as válvulas.

O procedimento para a realização deste experimento se dá inicialmente posicionando o atuador no final de curso, em seguida, três câmaras do atuador são confinadas com o fechamento de suas respectivas válvulas, com isso, fixa-se um volume constante para

a câmara em estudo mantendo a dinâmica da pressão igual para todas as amostras. Então a câmara que não foi confinada, é submetida a alterações entre pressão baixa e alta, com o tempo de “Atraso” na válvula selecionada para abrir variando na faixa de 0 a 80 ms com um incremento de 5 ms a cada experimento, como apresentado na Figura 3.

Com este procedimento há chaveamentos onde a “Válvula 1” da Figura 2 será a válvula de alta (degrau de pressão alta para baixa na câmara em estudo) e situações que a “Válvula 1” será a válvula de baixa (degrau de pressão baixa para alta na câmara em estudo), sendo assim na primeira situação será aplicado o “Atraso” na válvula de baixa na segunda situação o “Atraso” na válvula de alta.

Nos gráficos da Figura 3 são apresentadas as entradas de sinais para cada válvula durante um experimento, obtendo ao final 17 amostras, onde a diferença entre cada uma é o tempo de “Atraso” aplicado na válvula de recebe o sinal para que ocorra a abertura.

As pressões em análise das 17 amostras estão apresentadas na Figura 4. Lembrando que estes gráficos são resultados experimentais de estudo na câmara C com o cilindro avançado (Volume da câmara igual a  $2,204 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ ).

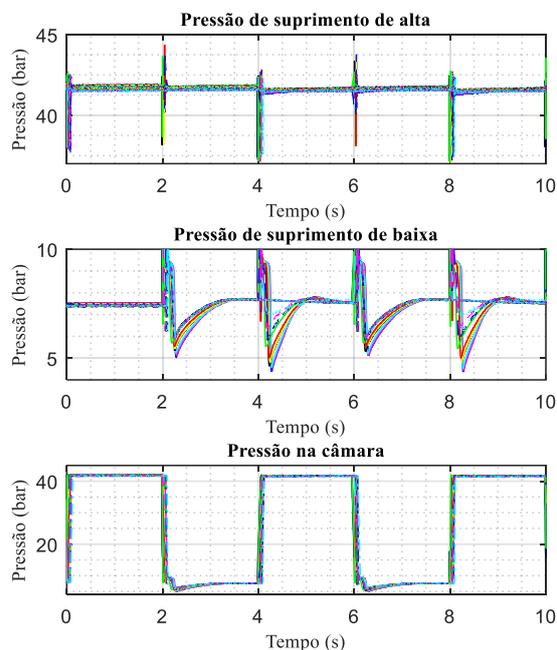


Figura 4<sup>4</sup>. Gráfico das pressões no chaveamento.

## 5 Análise dos resultados experimentais

Posteriormente a realização do experimento, foi realizada uma análise em regime transitório, ou seja, em intervalos onde ocorre a mudança da pressão na câmara, sendo que estes intervalos no experimento são:

<sup>4</sup> A legenda contida na Figura 3 é válida para análise destes gráficos.

- Chaveamento de pressão alta para baixa nos intervalos de 2 - 3,9 s e 6 - 7,9 s;
- Chaveamentos de pressão baixa para alta nos intervalos de 4 - 5,9 s e 8 - 9,9 s.

Como observar-se foram definidos dois intervalos para cada tipo chaveamento, isto, afim de realizar também uma avaliação de repetibilidade nos resultados.

Iniciando a análise com a transição de pressão na câmara do nível alto para baixo (intervalos 2 - 3,9 s e 6 - 7,9 s nos gráficos da Figura 4), ou seja, nesta situação é determinado o “Atraso” que se aplica para uma válvula que irá abrir quando a válvula de alta irá fechar.

Os comportamentos das pressões em situação de curto circuito são:

- **Pressão alta:** a pressão apresenta oscilação (queda), com tempo de estabilização<sup>5</sup> maior quanto maior o tempo em curto (está não é muito acentuada);
- **Pressão baixa:** apresenta uma oscilação (elevação seguida de queda), com tempo de estabilização e amplitude de oscilação na queda tão maior quanto maior o tempo em curto;
- **Pressão na câmara:** é influenciada pelas pressões de suprimento, apresentado maior impacto da pressão baixa.

Já os comportamentos das pressões em situação de câmara confinada são:

- **Pressão alta:** não apresenta oscilação;
- **Pressão baixa:** apresenta uma oscilação, mas com tempo menor de estabilização e equivalente para todos os atrasos;
- **Pressão na câmara:** novamente é influenciada pelas pressões de suprimento, apresentado maior impacto da pressão baixa.

A segunda análise é com a transição de pressão na câmara do nível baixo para alto (intervalos 4 - 5,9 s e 8 - 9,9 s nos gráficos da Figura 4), ou seja, nesta situação é determinado o “Atraso” que se aplica para uma válvula que irá abrir quando a de válvula de baixa irá fechar.

Os comportamentos das pressões em situação de curto circuito são:

- **Pressão alta:** apresenta oscilação (queda), sem alteração significativa no tempo de estabilização;
- **Pressão baixa:** apresenta uma oscilação (elevação seguida de queda), com tempo de estabilização e amplitude de oscilação na queda maior quanto maior o tempo em curto;
- **Pressão na câmara:** é influenciada pelas pressões de suprimento, apresentado maior impacto da pressão baixa.

Já os comportamentos das pressões em situação de câmara confinada são:

- **Pressão alta:** apresenta uma oscilação (queda), sem alteração significativa no tempo de estabilização;
- **Pressão baixa:** não apresenta oscilação;
- **Pressão na câmara:** novamente é influenciada pelas pressões de suprimento, apresentado maior impacto da pressão baixa.

Por meio desta análise dos resultados experimentais, foi verificado que a troca do estado da válvula, seja ela, de aberta para fechada ou fechada para aberta, provoca oscilações na pressão de suprimento, com comportamentos padronizados após o fechamento da válvula.

Com isso, nota-se que a pressão de baixa independente do sentido do chaveamento, sempre sofre uma oscilação com elevação seguida de queda, em relação a sua nominal, com a amplitude na queda e o tempo de estabilização proporcionais ao tempo em curto circuito.

Após o fechamento total da válvula o tempo de estabilização e a amplitude quando ocorre oscilação permanecem iguais para qualquer valor de “Atraso”, mostrando que o sistema está em situação de câmara confinada. Outro fator observado que independente do sentido de chaveamento, a pressão de alta sempre sofre uma queda quando em curto, o mesmo não acontece quando em situação de câmara confinada.

Sendo assim, nos intervalos de transições quando é subtraído a curva de pressão de nível alto pela curva de pressão de nível baixo é evidenciado que a área sob esta curva em mesmo período diminui à medida que o tempo de curto circuito diminui, também, quando não há curto circuito a área sob a curva permanece constante. Isto está observado no gráfico da Figura 5, onde estão o resultado para esta operação nas 17 amostras.

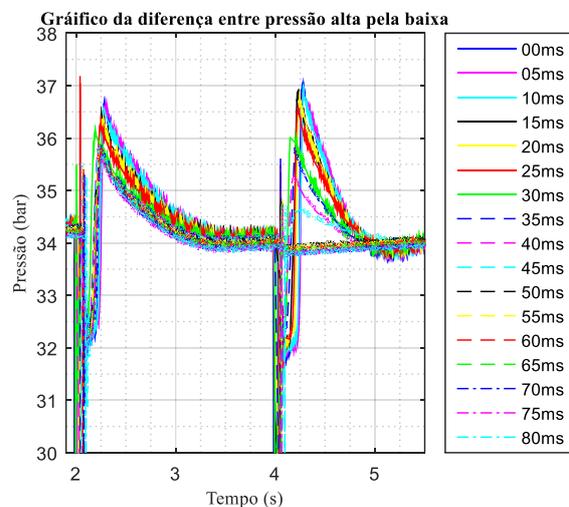


Figura 5. Gráfico de subtração entre a curva de pressão alta pela curva de pressão baixa.

Então, integrando cada curva gerada no gráfico da Figura 5 e plotando estes valores de cada integral

<sup>5</sup> Tempo para a pressão estabelecer o mesmo nível que antes do chaveamento.

em função do tempo de “Atraso” aplicado, gera-se os gráficos apresentados na Figura 6.

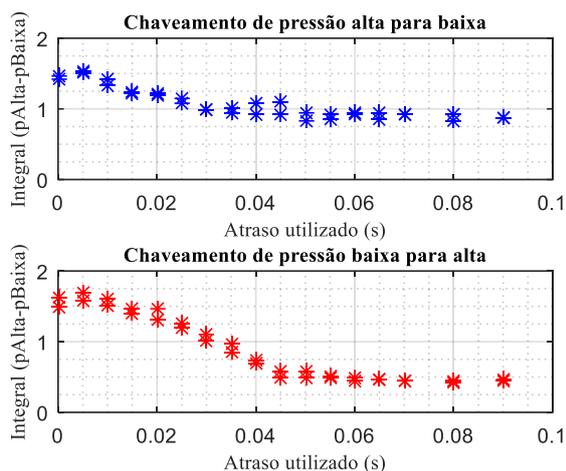


Figura 6. Gráfico com a integrais do diferencial de pressão de suprimento.

Quando é calculada a integral de cada curva para um determinado intervalo de tempo, tem-se como resultado o valor da área sob a mesma. Desta forma, pela conclusão realizada anteriormente por meio dos resultados experimentais, a medida que o valor do “Atraso” aumenta o resultado da integral diminui até que a válvula em questão esteja totalmente fechada, estabilizando o resultado da integral.

O primeiro comportamento observado nos gráficos da Figura 6, é uma repetibilidade no cálculo da integral em ambos intervalos, onde ocorrem o mesmo tipo de chaveamento na amostra (intervalos 2 - 3,9 s e 6 - 7,9 s no gráfico em azul e intervalos 4 - 5,9 s e 8 - 9,9 s no gráfico em vermelho). Pois, ao analisar os gráficos da Figura 6, em apenas 3 amostra a um afastamento de pontos, isto, indica uma variação do cálculo da integral do primeiro intervalo de análise em relação ao segundo intervalo. Estas 3 amostras são, a com “Atraso” de 0,02 s em vermelho e as com 0,04 e 0,045 s em azul.

O segundo aspecto observado é uma estabilização do valor das integrais das curvas de pressões em ambos os gráficos. Esta estabilização já esperada, ocorre a partir de quando o chaveamento está acontecendo em estado de câmara confinada. Sendo assim, em pontos antes desta estabilização o chaveamento está ocorrendo em estado de curto circuito.

Então por meio da segunda análise e tendo como conceito de chaveamento sincronizado quando a variável  $X$  tende a 0, atribui-se valores de “Atraso” para ambas situações de chaveamento. O valor de “Atraso” a ser aplicado na válvula que irá abrir quando a válvula de alta irá fechar é de 45 ms, pois, a curva tende a estabilizar a partir deste tempo de “Atraso”. Já o valor de “Atraso” a ser aplicado na válvula que irá abrir quando a válvula de baixa irá fechar é de 55 ms.

Ao analisar o valor atribuído para o “Atraso” a válvula que irá abrir no fechamento das duas válvu-

las, é evidente a diferença entre eles. Esta diferença está relacionada diretamente ao tempo de fechamento de cada válvula, pois, como apresentado no item 2.1 o tempo de abertura com o acelerador é praticamente idêntico para todas as válvulas, porém, o tempo de fechamento tem um intervalo 6 vezes maior de variação entre as válvulas. E esta diferença também está relacionada o porquê para definir o valor do “Atraso” a ser aplicado, é importante saber qual válvula irá fechar independente de qual irá abrir.

Outro aspecto importante a destacar, é que diferente do método de Breidi et al. (2015) onde é estimado o tempo de fechamento e o tempo de abertura da válvula, agora, nesta alternativa ao método já é estimado diretamente a variável “Atraso” no chaveamento entre duas válvulas.

## 6 Conclusão

Conforme apresentado, um dos principais fatores para alcançar uma suavidade de movimentação do cilindro sem perda de eficiência energética é o sincronismo durante os chaveamentos de pressões nas câmaras. Este sincronismo só é possível com o conhecimento do “Atraso” que é aplicado para cada válvula em cada chaveamento. Sendo assim, a proposta deste artigo foi analisar uma forma alternativa de obter este “Atraso”, que não pelo ensaio individual de cada válvula, onde ele era estimado pelo tempo de fechamento da válvula.

A técnica adotada foi a análise do comportamento das pressões durante chaveamentos no próprio bloco de válvulas digitais, a qual mostrou-se uma opção na sincronização do chaveamento para este sistema de hidráulica digital específico.

A pesquisa para a suavização de chaveamento em sistemas digitais está em fase inicial, sendo este estudo os primeiros resultados. Dentre as perspectivas futuras desta pesquisa estão também:

- Uso de um modelo matemático com detalhamento aprofundado, assim realizando análises com variações paramétricas (por exemplo variação do volume a jusante e montante das válvulas) para o aprimoramento deste método, generalizando-o para diferentes sistemas hidráulicos digitais;
- O desenvolvimento de um controlador para a correção dinâmica do tempo de “Atraso”, assim mantendo sempre o chaveamento sincronizado;
- Estudo da melhor forma para que ocorra a troca das pressões nas câmaras;
- Uso do histórico de correção dinâmica para avaliar a vida útil da válvula;

## Agradecimentos

Os autores agradecem a empresa Wipro pela doação do cilindro especial multicâmaras, a empresa Bosch Rexroth pela doação das válvulas digitais e a Fapesc pelo apoio financeiro do projeto de pesquisa.

## Referências Bibliográficas

- Belan, H.C. (2018) 'Sistemas de atuação hidráulicos digitais para aviões com foco em eficiência energética', Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Florianópolis, Brasil.
- Belan, H.C., Lantto, B., Krus, P. and De Negri, V.J. (2016) 'Digital Hydraulic Actuator (DHA) concept for aircraft actuation systems', Conference of Recent Advances in Aerospace Actuation Systems and Components - R3ASC 2016, Toulouse, France.
- Belan, H.C., Locateli, C.C., Endler, L., De Pieri, E.R. and De Negri, V.J. (2014) 'Aumento da eficiência energética em sistemas hidráulicos utilizando hidráulica digital', Belo Horizonte, Brasil.
- Belan, H.C., Locateli, C.C., Lantto, B., Krus, P. and De Negri, V.J. (2015) 'Digital Secondary Control Architecture for Aircraft Application', The Seventh Workshop on Digital Fluid Power, Linz, Austria.
- Bregalda, R., Kulman, C. and Belan, H.C. (2016) 'Desenvolvimento e análise de equipamento eletrônico para aceleração de válvulas solenóide com vistas à aplicação em hidráulica digital', Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Controle e Automação, Chapecó, Brasil.
- Breidi, F., Helmus, T. and Lumkes, J. (2015) 'The impact of peak-and-hold and reverse current solenoid driving strategies on the dynamic performance of commercial cartridge valves in a digital pump/motor', International Journal of Fluid Power, pp. 1-12.
- Dell'Amico, A., Carlsson, M., Norlin, E. and Sethson, M. (2013) 'Investigation of a Digital Hydraulic Actuation System on an Excavator Arm', Linköping, Sweden.
- Hansen, A.H. and Pedersen, H.C. (2016) 'Reducing pressure oscillations in discrete fluid power systems', Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, pp. 1-13.
- Huova, M., Aalto, A., Linjama, M., Huhtala, K., Lantela, T. and Pietola, M. (2017) 'Digital hydraulic multi-pressure actuator – the concept, simulation study and first experimental results', International Journal of Fluid Power, vol. 18, no. 3, pp. 1-13.
- Linjama, M. (2011) 'Digital fluid power-state of the art', Tampere, Finland.
- Linjama, M., Vihtanen, H.P., Sipola, A. and Vilenius (2009) 'Secondary controlled multi-chamber hydraulic cylinder', Linköping, Sweden.
- Locateli, C.C., Teixeira, P.L., De Pieri, E.R., Krus, P. and De Negri, V.J. (2014) 'Digital hydraulic system using pumps and on/off valves controlling the actuator', Lappeenranta, Finland.
- Naayagi, R.T. (2013) 'A Review of More Electric Aircraft Technology', Nagercoil, India.
- Pereira-Dias, D., Peixoto, A.J. and Costa, R.R. (2014) 'Modelagem, identificação e controle do sistema de posicionamento uma máquina hidráulica de fadiga', Belo Horizonte, Brasil.
- Schepers, I., Weiler, D. and Weber, J. (2012) 'Comparison and Evaluation of Digital Control Methods for ON/OFF Valves', Tampere, Finland..
- Tanaka, Y. and Sakama, S. (2013) 'Comparative Study on Dynamic Characteristics of Hydraulic, Pneumatic, and Electric Motors', Sarasota, Florida, USA.
- Virvalo, T. and Vilenius, M. (2000) 'The Influence of Pumps and Valves on the Efficiency of a Hydraulic Boom', in Garbacik, A. and Stecki, J. (ed.) Developments in Fluid Power Control of Machinery and Manipulators, Cracow: Fluid Power Net Publication.