

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UMA VÁLVULA HIDRÁULICA DE CONTROLE DIRECIONAL EM  
DIMENSÕES REDUZIDAS

por

Lucas Maciel Catarino

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2017



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

DESENVOLVIMENTO DE UMA VÁLVULA HIDRÁULICA DE CONTROLE DIRECIONAL EM  
DIMENSÕES REDUZIDAS

por

Lucas Maciel Catarino

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thammy Cristina Hayashi  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Eduardo André Perondi

Comissão de Avaliação:

Prof. Prof. Fabiano Disconzi Wildner

Prof. Patric Daniel Neis

Prof. Tiago Becker

Porto Alegre, 08 de Dezembro de 2017.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente aos meus pais, Denize e Luiz, à minha madrasta, Marilene, e aos meus irmãos, Bruna e Felipe, pelo apoio e paciência incondicionais durante toda a graduação. E à minha filha, Manuela, que mostrou-se uma fonte inesgotável de inspiração para o término dessa etapa.

À minha namorada, Giuliana Colameo, pela motivação e companheirismo imensuráveis durante esta etapa.

Ao professor Eduardo Perondi pela orientação, mostrando-se sempre atencioso e confiante na elaboração do presente trabalho, partilhando didaticamente do seu vasto conhecimento na área.

Ao Laboratório de Mecatrônica e Controle (LAMECC), pela ajuda irrestrita ao longo do desenvolvimento deste trabalho, em especial a Eder Gonçalves, por mostrar-se sempre solícito fornecendo o uso das dependências do laboratório e ao engenheiro Henrique Mendel, por partilhar seus conhecimentos e experiências.

CATARINO, L. M. **Desenvolvimento de Uma Válvula Hidráulica de Controle Direcional em Dimensões Reduzidas**. 2017. 25f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

## RESUMO

O presente trabalho objetiva desenvolver, a partir do estudo de válvulas comerciais, uma válvula hidráulica de controle direcional mais compacta que as encontradas usualmente no mercado. A válvula em questão, compõe o sistema hidráulico de atuação de um robô para inspeção de dutos e que consiste em um projeto de pesquisa em desenvolvimento entre o Laboratório de Mecatrônica e Controle (LAMECC) da UFRGS, em parceria com a Petrobrás e com o Instituto de Informática da UFRGS. O seu dimensionamento realizou-se através da importação de um modelo sólido computacional de uma válvula comercial, a qual tem suas funcionalidades adaptadas de acordo com os requisitos do projeto, mantendo sua característica de usar um carretel (*spool*) como elemento direcionador da vazão. Concluído seu dimensionamento, realiza-se um estudo visando a validar sua viabilidade de aplicação através da modelagem matemática do seu sistema físico utilizando os parâmetros de operação robô. Essa modelagem utiliza equações de acoplamento dinâmico entre sistemas elétricos, mecânicos e hidráulicos, permitindo a obtenção de equações diferenciais que correspondam ao comportamento físico do sistema físico em questão. O modelo matemático obtido permite verificar se a vazão que resulta do deslocamento do *spool* consegue suprir a vazão mínima necessária. Esse procedimento é realizado considerando os dados de um solenoide comercial obtidos de um catálogo de fabricante, os quais relacionam a força de atuação do solenoide com o deslocamento do *spool* ocasionado pela aplicação da própria força eletromagnética, em um processo iterativo. Por meio da implantação do modelo desenvolvido em um software de simulação numérica dinâmica (Matlab/Simulink), obteve-se os resultados que confirmam que a válvula proposta tem capacidade de fornecer a vazão necessária para o correto comportamento do sistema.

**PALAVRAS-CHAVE:** desenvolvimento de válvula hidráulicas, robô de desobstrução, controle de sistemas hidráulicos

CATARINO L. M. **Development of a Hydraulic Directional Valve Control in Reduced Dimensions**. 2017. 25f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

## **ABSTRACT**

This paper aims to develop, from the study of commercial valves, a hydraulic directional control valve more compact than those usually found in the market. The valve in question composes the hydraulic actuation system of a robot for pipeline inspection and consists of a research project under development between the Laboratory of Mechatronics and Control (LAMECC) of UFRGS, in partnership with Petrobras and the Institute of Computer Science at UFRGS. Its sizing was accomplished through the importation of a solid computational model of a commercial valve, which has its functionalities adapted according to the requirements of the project, maintaining its characteristic of using a spool as a flow direction element. Once its sizing is completed, a study is carried out to validate its viability of application through the mathematical modeling of its physical system using the parameters of robot operation. This modeling uses dynamic coupling equations between electrical, mechanical and hydraulic systems, allowing differential equations that correspond to the physical behavior of the physical system in question to be obtained. The obtained mathematical model allows verifying if the flow that results from the displacement of the spool can supply the minimum necessary flow. This procedure is performed considering the data of a commercial solenoid obtained from a manufacturer's catalog, which relates the solenoid actuation force to the spool displacement caused by the application of the electromagnetic force itself, in an interactive process. By implementing the model developed in a dynamic numerical simulation software (Matlab / Simulink), we obtained the results that confirm that the proposed valve has the capacity to provide the necessary flow for the correct behavior of the system.

**KEYWORDS:** Development of hydraulic valve, Hydraulic control systems, Inspection robots

## INDÍCE

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
2.1	Sistemas Hidráulicos .....	1
2.2	Componentes Hidráulicos .....	2
2.2.1	Bomba Hidráulica .....	2
2.2.2	Válvulas Hidráulicas .....	2
2.2.2.1	Válvulas Direcionais .....	2
2.2.3	Atuadores Hidráulicos .....	3
3	METODOLOGIA .....	3
3.1	Projeto Annelida .....	3
3.2	Módulo Básico .....	4
3.3	Circuito Hidráulico .....	6
3.3.1	Seleção dos Componentes Hidráulicos .....	6
3.3.1.1	Bomba Hidráulica .....	7
3.3.1.2	Cilindro de Dupla Ação .....	7
3.3.2	Dimensionamento do Conjunto Válvula e <i>Spool</i> .....	7
3.3.2.1	Modelo Comercial .....	7
3.3.2.2	Adaptação do Modelo .....	8
3.4	Análise de Viabilidade dos Modelos Propostos .....	9
3.4.1	Modelagem Matemática .....	10
3.4.1.1	Representação do Modelo Matemático por Diagrama de Blocos .....	11
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	12
4.1	Resultados das Simulações Numéricas .....	12
5	CONCLUSÃO .....	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	14
	APÊNDICE A: Diagrama de Blocos Referente ao Modelo Matemático da Válvula .....	16
	APÊNDICE B: Parâmetros de Entrada da Simulação Numérica .....	17
	ANEXO A: Modelo da Bomba Hidráulica Adquirida .....	18
	ANEXO B: Modelo do Solenoide Selecionado .....	19

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios na área da operação de oleodutos submarinos é a presença de bloqueios procedentes do acúmulo de hidrocarbonetos e parafinas. Isso ocorre devido às condições apresentadas nos poços (a baixa temperatura ambiente no fundo do mar e pressões de mais de 600 m de coluna de água), além da característica do óleo pesado predominante nessa região de exploração. Esses fatores contribuem determinadamente para a saturação dos hidrocarbonetos líquidos e gasosos presentes nos dutos submarinos.

Diante das necessidades operacionais das companhias de petróleo e do interesse acadêmico, atualmente desenvolve-se um projeto de pesquisa no Laboratório de Mecatrônica e Controle (LAMECC) da UFRGS, em parceria com a Petrobrás e com o Instituto de Informática, também pertencente a UFRGS, que visa o desenvolvimento de um sistema robótico para inspeção de dutos de 4 a 10 polegadas e que apresente a habilidade de executar curvas cujo raio de curvatura seja de 5 vezes o diâmetro do duto.

Assim, o presente trabalho de conclusão de curso insere-se nos esforços de concepção, projeto e construção de um sistema hidráulico de atuação do robô em desenvolvimento.

Devido a seus aspectos inovadores, inúmeras restrições quanto à utilização de soluções comerciais apresentadas durante o desenvolvimento do projeto. Um desses problemas está associado, especificamente, à seleção e dimensionamento dos componentes hidráulicos que constituem o sistema de potência do robô.

Dentre os diversos componentes que constituem esse sistema hidráulico encontram-se as válvulas, responsáveis por diversas funcionalidades, sendo uma dessas, especificamente, o direcionamento do fluxo hidráulico, caracterizando-as como válvulas direcionais de controle de fluxo.

Assim, o principal objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento, a partir do estudo de válvulas comerciais, de uma válvula direcional mais compacta que as encontradas usualmente no mercado e com as características adequadas à operação do robô, obedecendo às restrições do projeto.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Sistemas Hidráulicos

Um sistema hidráulico, segundo Linsingen, 2001, é um conjunto de elementos físicos convenientemente associados que, utilizando um fluido como meio de transferência de energia, permite a transmissão e controle de forças e movimentos, possibilitando que, com uma combinação apropriada do seus elementos físicos (componentes), cada qual com características operacionais próprias, seja possível considerar esse sistema como uma associação de grupos de componentes com funções bem definidas de conversão, controle e limitação de energia. Akers, 2006, apresenta vantagens dos sistemas em relação aos demais:

- Baixa relação peso/potência, ou seja, o sistema transmite forças e torque elevados com dimensões relativamente pequenas;
- Resposta rápida de partida e inversão dos movimentos, devido à inércia relativamente baixa;
- É indicado tanto para sistemas com altas velocidades quanto para sistemas lentos, pois apresenta um bom controle em ambos os casos;
- Capacidade de armazenamento de energia de forma relativamente simples, por meio de acumuladores;
- Flexibilidade na escolha dos componentes, composição e montagem dos diversos elementos;
- Na maioria dos casos, o fluido de trabalho funciona também com lubrificante.

## 2.2 Componentes Hidráulicos

Um sistema hidráulico típico, é composto por uma bomba, dutos e conexões, unidades de tratamento (filtros e purgadores), atuadores e válvulas.

### 2.2.1 Bomba Hidráulica

As bombas hidráulicas convertem energia mecânica em energia hidráulica, sendo responsáveis pela manutenção da vazão e pressão em um circuito hidráulico. As mesmas, podem ser classificadas em dois grupos [Palmieri, 1997]:

a) Bombas de deslocamento não positivo: trabalham em baixas pressões, em torno de 700 kPa, e qualquer variação de pressão afeta significativamente a capacidade de vazão da bomba. As perdas de carga ocorrem principalmente na parede devido a inércia do fluido de trabalho.

b) Bombas de deslocamento positivo ou hidrostáticas: um volume do fluido é deslocado após sofrer um acréscimo de pressão. Essa forma de transferência de fluido proporciona um deslocamento aproximadamente uniforme do fluido mesmo em altas pressões. Nesse tipo de bomba, a vazão cresce proporcionalmente à rotação.

Rotineiramente, em máquinas e equipamentos hidráulicos em geral, as pressões de trabalho são elevadas, sendo incomum encontrar aplicações de bombas de deslocamento não positivo.

### 2.2.2 Válvulas Hidráulicas

Ações de controle relacionadas à dissipação de energia são chamadas de controle resistivo. Sistemas baseados nessa estratégia atuam por meio de válvulas de controle de pressão e vazão que transformam parte da energia hidráulica em energia térmica. Essa estratégia impõe ao sistema o fornecimento de uma potência superior à requerida pela aplicação. Essa solução é indicada em aplicações onde se deseja respostas rápidas [Linsingen, 2001].

#### 2.2.2.1 Válvulas Direcionais

Segundo Fialho, 2002, essas válvulas são responsáveis pelo direcionamento do fluido dentro do sistema, desviando o fluxo para onde seja necessário. Uma de suas aplicações é esquematizada na Figura 2.1.

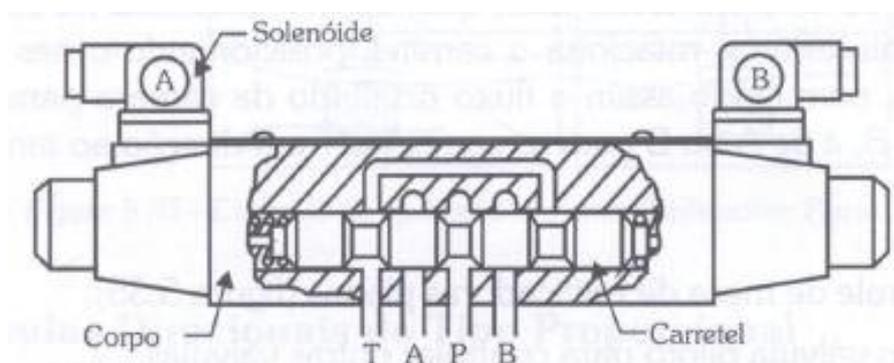


Figura 2.1: Utilização de carretel (*spool*) deslizante em uma válvula 4/3 vias, acionada por solenóide e centrada por mola. Fonte: Fialho, 2002.

### 2.2.3 Atuadores Hidráulicos

O cilindro hidráulico tem a função de executar movimentos de translação (lineares) e com isto transmitir forças, caracterizando-se por ser o elo de união entre o circuito hidráulico e a máquina operada [Exner, H. et al, 2002].

Os cilindros podem ser classificados de acordo com o seu modo de ação, havendo os de simples ação, o qual exerce força em apenas uma direção e os de dupla ação. A Figura 2.2 mostra esquema de ambos.



Figura 2.2: Representação do cilindro de dupla ação do tipo diferencial e do cilindro de simples ação com retorno por mola. Fonte: Exner, H. et al, 2002.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Projeto Annelida

O projeto *Annelida* fundamenta-se na necessidade de encontrar-se uma solução para a obstrução dos dutos devido a bloqueios procedentes do acúmulo de hidrocarbonetos e parafinas.

Os anelídeos, ou *annelida*, filo que caracteriza animais com estrutura corporal cilíndrica e segmentada, movimentam-se de maneira peristáltica. Esse tipo de movimentação motivou a caracterização de uma classe de robôs projetados para percorrem tubulações, denominados *inchworm*, exemplificado na Figura 3.1.



Figura 3.1: Módulo de fixação nas paredes de uma tubulação. Fonte: [http://www.act.sys.okayama-u.ac.jp/kouseigaku/research/takata\\_arm/english.htm](http://www.act.sys.okayama-u.ac.jp/kouseigaku/research/takata_arm/english.htm)

Tipicamente, a configuração física desses robôs denomina-se por módulo, de acordo com a sua funcionalidade. A complexidade dos problemas a serem solucionados mostrou que em certas situações apenas um módulo não é suficiente. Assim, uma outra configuração encontrada (Figura 3.2) baseia-se em uma configuração na qual os módulos com capacidade de tração –

denominados de ativos-, são acoplados a outros que não possuem tração, denominados de passivos (Jun, et. al., 2004).



Figura 3.2: Protótipos de robô inchworm feito em uma impressora 3D deslocando-se em uma tubulação.

Fonte: Zarrouk e Shoham, 2012.

### 3.2 Módulo Básico

Devido ao ambiente altamente agressivo de operação impõe-se a necessidade de encapsulamento de alguns dos componentes que integram o sistema, casos, por exemplo, da bomba e das válvulas hidráulicas. Essa cápsula, a qual denominou-se de módulo básico, e tem sua representação esquemática conforme a Figura 3.3, baseou-se em premissas básicas para seu dimensionamento:

- Capacidade dimensional para realizar curvas cujo o raio de curvatura, seja de até 5 vezes o diâmetro do duto;
- Maximizar seu volume interno disponível para a inserção dos componentes;
- Diâmetro interno do duto considerado é de 4 polegadas;
- Atuação de pressão externa de 300 bar;
- Modelo geométrico de um cilindro de tampa reta de espessura  $t$ ;

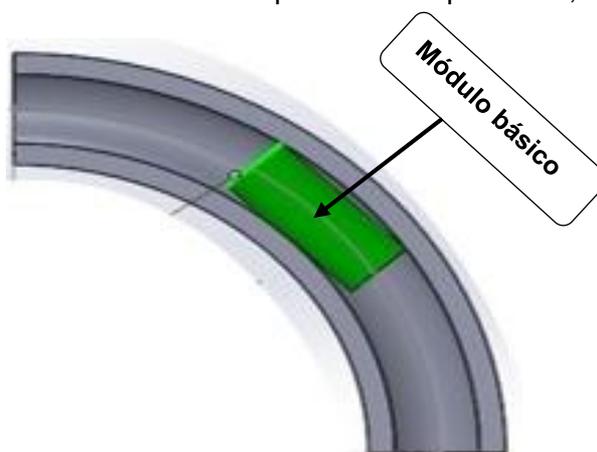


Figura 3.3: Desenho esquemático do módulo básico no interior do duto.

Modhaddam e Jerban, 2015, desenvolveram equações analíticas que buscam prever as dimensões máximas e mínimas do módulo básico, cuja modelagem matemática baseou-se na geometria da Figura 3.4.

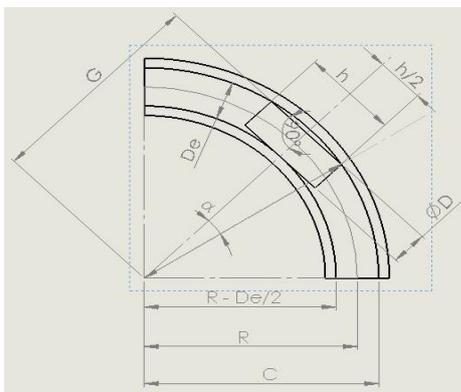


Figura 3.4: Representação do dimensionamento do módulo básico. Fonte: Modhaddam e Jerban, 2015.

Na Figura 3.4, as dimensões  $h$  e  $D$  são, respectivamente, comprimento e diâmetro, respectivamente, do módulo básico, tendo sido projetado para possuir as menores dimensões possíveis para realizar curvas de até 5 vezes seu diâmetro, ou seja, usa-se a hipótese de que  $R \leq 5D$ , sendo  $R$  o raio de curvatura do duto.

A partir das relações trigonométricas obtêm-se duas equações que relacionam o diâmetro e a altura do cilindro que forma o módulo básico:

$$\text{sen } \alpha = \frac{h}{11De}, \quad (3.1)$$

$$\text{cos } \alpha = \frac{(9De/2) + D}{(11De/2)}, \quad (3.2)$$

Combinando-se ambas equações, resulta uma equação segundo a qual, uma vez escolhido o diâmetro  $D$  ou a altura  $h$  do cilindro, o outro parâmetro pode ser calculado em função do diâmetro interno do duto e do seu raio de curvatura:

$$h = 22R \text{sen}[\arccos((9R + D)/11R)], \quad (3.3)$$

Tendo o diâmetro do módulo básico uma restrição conhecida na sua dimensão, ou seja, deve ser menor que 4 polegadas, opta-se por escolher valores factíveis de  $D$  resultando em respectivos valores de  $h$ .

Para um cilindro de tampa reta, de raio interno  $a$  e espessura  $t$ , o volume útil (interno) pode ser calculado como:

$$V = \pi a^2 (h - 2t), \quad (3.4)$$

Os valores obtidos a partir da Equação 3.4 são representados pela Tabela 3.1, com o respectivo diâmetro

Tabela 3.1: Dimensões dos módulos básicos que resultam no maior volume útil

Parâmetro	Módulo 1	Módulo 2
Diâmetro [pol]	3,5	3
Comprimento [mm]	236,91	333,11
Volume [mm <sup>3</sup> ]	912875	970248

### 3.3 Circuito Hidráulico

A lógica de sequenciamento e disposição de componentes hidráulicos deve ser construída de maneira a executar as funções requisitadas pelo projeto.

Para o deslocamento do robô ao longo do seu trajeto no interior do duto, propôs-se o circuito hidráulico representado na Figura 3.5.

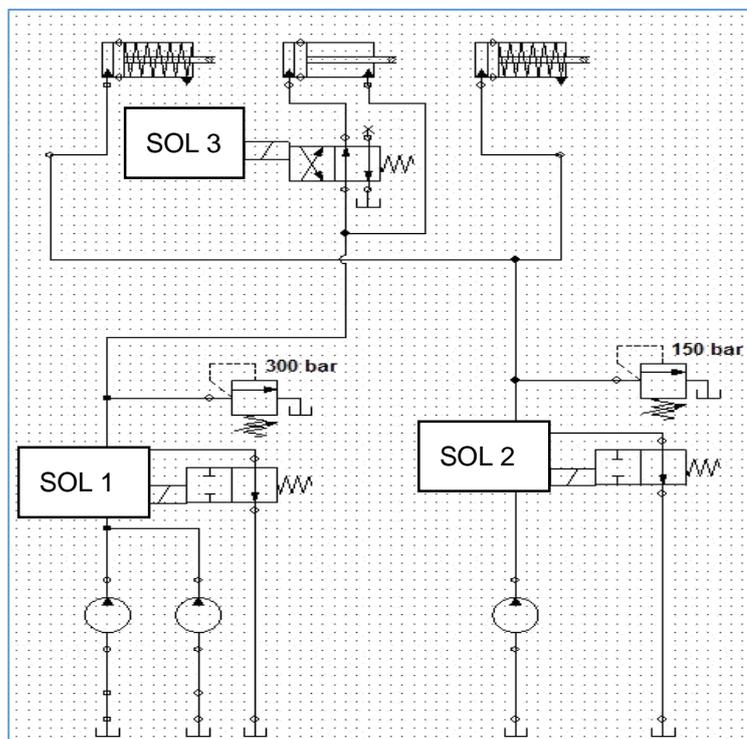


Figura 3.5: Diagrama representativo da lógica do circuito hidráulico. Fonte: LAMECC

O controle das ações dos cilindros resulta da ação das válvulas direcionais 1, 2 e 3, representadas na Figura 3.5 por SOL 1, SOL 2 e SOL 3, respectivamente e as quais têm acionamento através de um solenoide.

Observa-se que no momento em que a bomba é ligada, há o retorno do fluido ao reservatório através da válvula SOL 1. Com o acionamento do solenoide da válvula SOL 1, há o avanço do cilindro, resultando, então, no retorno do fluido ao reservatório, através da válvula limitadora de pressão 2, com regulagem para 300 bar. O retorno do cilindro, ou seja, a movimentação do robô, é feito pelo acionamento do solenoide da válvula SOL 3.

Neste sistema regenerativo apresentado, tem-se um ganho na velocidade de avanço do cilindro, uma vez que a porção do êmbolo é alimentada pelo fluido da bomba e o presente na porção da coroa. O avanço do cilindro ocorre simplesmente para que o conjunto das patas frontal possa se deslocar e travar, para então o robô todo se mover.

Classifica-se esse sistema de regenerativo devido ao ganho na velocidade de avanço do cilindro, uma vez que a porção do êmbolo é alimentada tanto pelo fluido da bomba quanto pelo presente na porção da coroa.

#### 3.3.1 Seleção dos Componentes Hidráulicos

A implementação do sistema hidráulico destina-se a atender demandas estabelecidas durante o desenvolvimento do projeto *Annelida*. Restringindo-se ao escopo do presente trabalho,

que refere-se ao circuito hidráulico anteriormente apresentado, os parâmetros que seguem são considerados imprescindíveis para a seleção e dimensionamento dos componentes hidráulicos:

- Arranjo da lógica hidráulica inserida nas dimensões do módulo básico;
- Capacidade de força: **20 kN**;
- Velocidade média de deslocamento do robô: **5 cm/s**;
- Vazão mínima: **3,5 l/min**
- Pressão de operação: **300 bar**;

### 3.3.1.1 Bomba Hidráulica

Visando a atender aos requisitos de vazão e pressão de operação, selecionou-se bomba hidráulica modelo PB36.5 (050720) – conforme Anexo A -, fornecida pela empresa Hydroeduc. Unitariamente o modelo fornece 0,44 l/min. Sendo a vazão total mínima necessária de 3,5 l/min, necessitam-se de um total de 8 bombas – totalizando-se uma vazão de 3,52 l/min – para suprimento da vazão requerida.

### 3.3.1.2 Cilindro de Dupla Ação

Devido ao recuo do cilindro principal desempenhar a ação de avanço do robô em relação ao duto, dimensiona-se o cilindro para o que mesmo tenha a capacidade de carga (20 kN) necessária e que opere com a pressão exigida (300 bar). Baseando-se em soluções comerciais, obteve-se diâmetros de 1,5 polegadas (38,1 mm) 0,625 polegadas (15,87mm) para o êmbolo e para a haste, respectivamente. Estes valores resultam em uma força de recuo do cilindro de aproximadamente 28 kN, com 300 bar de pressão.

## 3.3.2 Dimensionamento do Conjunto Válvula e Spool

### 3.3.2.1 Modelo Comercial

A partir da inviabilidade de utilização de válvulas comerciais para implementação no projeto de um conjunto de 3 válvulas em um único módulo básico, iniciou-se o estudo de desenvolvimento de uma válvula específica cuja funcionalidade seja compatível com os requisitos do presente projeto. Visando alcançar o objetivo de obter um conjunto de válvulas de dimensões reduzidas que atendessem às necessidades do projeto, optou-se por iniciar o projeto estudando o *design* de uma válvula comercial de porte médio (60 l/min).

A válvula é de um fabricante nacional, sendo sua vista em corte apresentada na Figura 3.6, a qual mostra o modelo da válvula a ser analisada, com seu respectivo *spool* deslizante

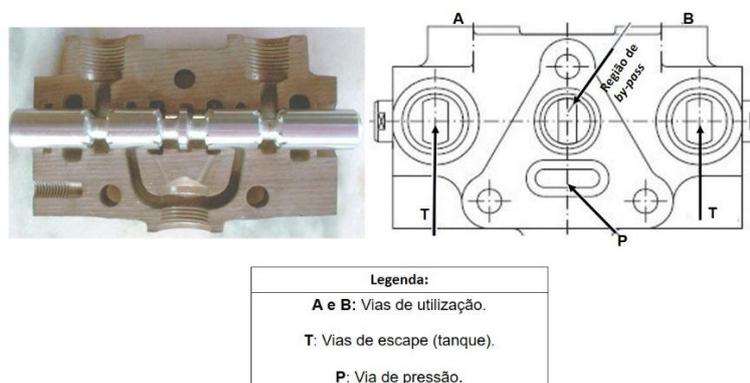


Figura 3.6: Vista em corte da válvula original com o *spool* em sua posição inicial. Ao lado, sua representação em desenho técnico, destacando a região de by-pass.

Foi obtido um modelo sólido computacional da válvula e do *spool*, a partir de desenhos técnicos de produto, conforme apresenta-se na Figura 3.7.

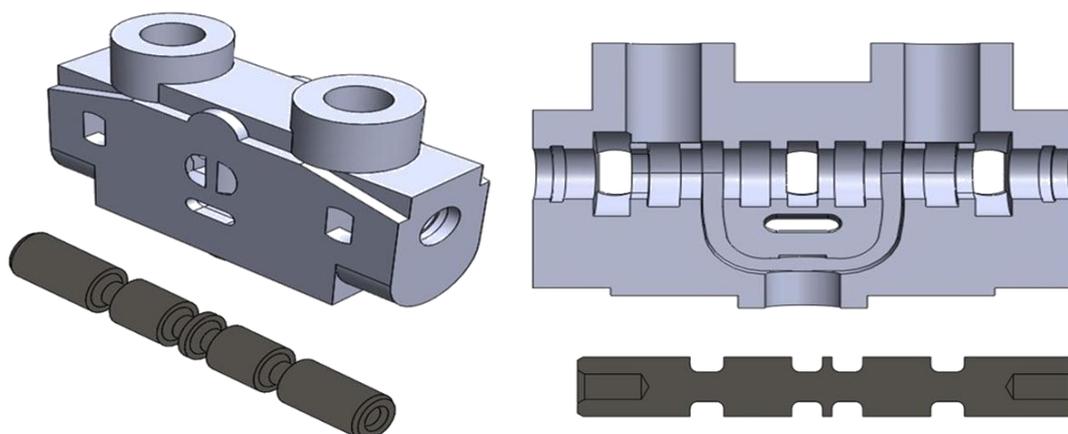


Figura 3.7: Vista isométrica e em corte da válvula importada e do *spool*. Fonte: Autor.

### 3.3.2.2 Adaptação do Modelo

Utilizando este modelo sólido computacional, foram analisadas inicialmente as funcionalidades da válvula que não teriam utilidade para o projeto proposto.

Uma das características da válvula original é a existência de um *by-pass* cuja função é permitir a vazão do fluido entre os corpos de válvulas lado a lado em um *manifold*. Esta função não tem utilidade no presente projeto e deverá ser suprimida na versão final da válvula. A seguir, verificou-se que os ressaltos usados para conexão das vias de atuação, seguido da diminuição nos seus diâmetros e do canal de bifurcação, também não teriam função no presente projeto e poderiam ser suprimidos. As mudanças realizadas e o modelo resultante são mostrados na Figura 3.8.

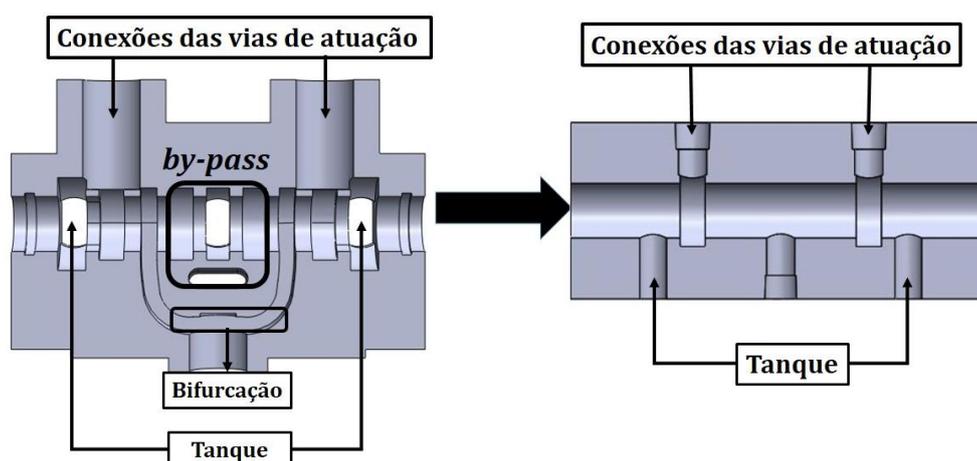


Figura 3.8: Mudanças realizadas no modelo comercial e o modelo resultante.

A mudança na funcionalidade da válvula, resulta na necessidade de mudança também na geometria do *spool*. A representação do funcionamento do novo conceito, em comparação com o do modelo comercial é apresentada na Figura 3.9, sendo a posição 1 a posição inicial da válvula, em que não há fluxo de óleo, a posição 2 mostra o deslocamento do *spool*, após o acionamento do solenoide, na direção +x e que resulta no fluxo de óleo para uma das vias de

conexão e paralelamente o fluxo de óleo da outra via de conexão para a via de tanque. A posição 3 resulta na mesma lógica da posição 2, alterando-se a direção do *spool* e, conseqüentemente, invertendo-se o fluxo de óleo em relação a posição 2.

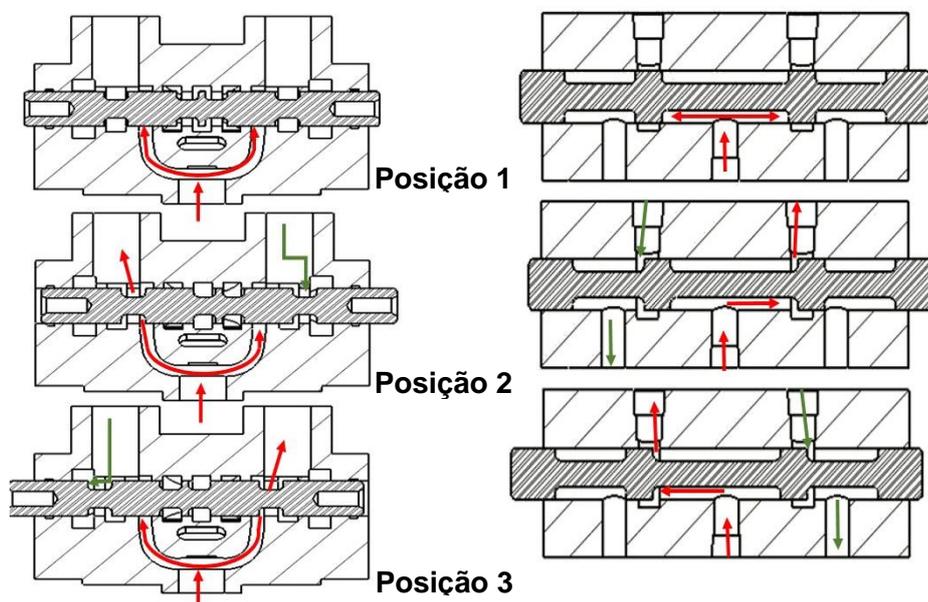


Figura 3.9: Esquema do funcionamento do fluxo de óleo do modelo original e do modelo adaptado.

Por fim modificou-se a válvula para suas dimensões finais. A Figura 3.10 mostra a comparação dimensional entre os modelos.

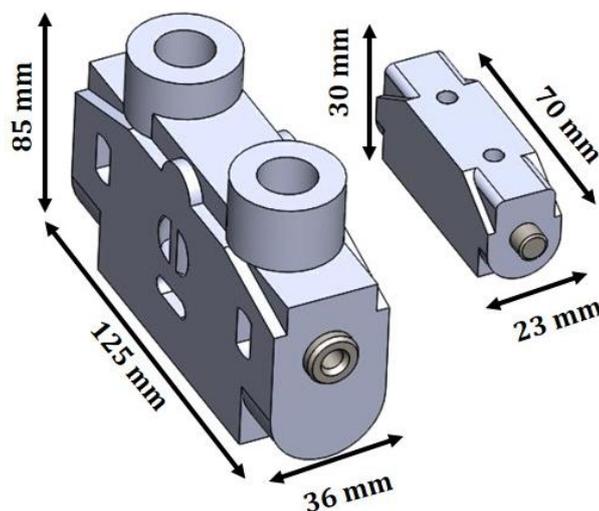


Figura 3.10: Comparação dimensional do modelo comercial e do modelo adaptado da válvula.

### 3.4 Análise de Viabilidade dos Modelos Propostos

Após a adaptação dimensional da válvula, é necessário analisar se o modelo é capaz de fornecer a vazão necessária ao cilindro a partir da pressão de suprimento da bomba. Realiza-se

essa análise verificando se a vazão obtida a partir do deslocamento do *spool*, através do orifício de passagem, é maior do que a vazão mínima exigida pelo projeto.

### 3.4.1 Modelagem Matemática

A modelagem matemática de um sistema físico consiste na representação do seu comportamento (dinâmico ou estático) através de equações matemáticas capazes de descrevê-lo.

O sistema físico de uma válvula em que a vazão decorre pelo deslocamento do *spool*, caracteriza-se por ser constituído um subsistema eletromecânico e por um sistema hidromecânico. Configura-se um subsistema eletromecânico devido a tensão aplicada ao solenoide gerar a força que desloca o *spool*. Por sua vez, o subsistema hidromecânico é consequência do eletromecânico, pois a vazão através do orifício de passagem da válvula vai resultar no deslocamento do êmbolo do cilindro.

Segundo Merrit, 1967 o cálculo das vazões relativas ao deslocamento do *spool* da válvula  $x_v$  pode ser feito através da Equação (3.5), obtida a partir da equação de Bernoulli, que relaciona a vazão através de um orifício com a diferença de pressão a montante e a jusante:

$$J = C_d A_0 \sqrt{2\Delta p / \rho}, \quad (3.5)$$

em que  $C_d$  é o coeficiente de descarga,  $A_0$  a área de passagem do orifício e  $\rho$  a massa específica do fluido.

O termo referente a  $A_0$  pode ser substituído na Equação (3.5) pela Equação (3.6):

$$A_0 = x_v \ell, \quad (3.6)$$

onde  $\ell = 2\pi r$  representa a largura efetiva do orifício e  $r$  o raio interno da câmara da válvula.

Assim, pode reescrever-se a Equação 3.5 como:

$$J = k_d x_v \sqrt{\Delta p}, \quad (3.7)$$

em que  $k_d = C_d \ell \sqrt{2/\rho}$  é denominado de constante do orifício.

A vazão ainda pode ser descrita como uma função de  $x_v$  e da pressão diferencial  $p_\Delta$ . A pressão diferencial é gerada devido à passagem de potência hidráulica para a carga mecânica e é definida pelo diferencial de pressão nos dois lados do êmbolo. Assim, a Equação (3.7) pode ser reescrita como:

$$J = k_d x_v \sqrt{p_s - |p_\Delta|}. \quad (3.8)$$

Sendo  $p_s$  a pressão de suprimento.

Nota-se, a partir da Equação (3.8), como a velocidade de deslocamento do êmbolo e a vazão volumétrica variam linearmente com o deslocamento do *spool*  $x_v$ . A Equação 3.8 ainda pode ser reescrita como:

$$p_\Delta = p_s - \left(\frac{J}{k_d x_v}\right)^2 \quad (3.9)$$

A partir de  $p_\Delta$ , é possível calcular a força máxima de atuação no êmbolo

$$F_\Delta = p_\Delta A_p \quad (3.10)$$

onde  $A_p$  é a área do êmbolo.

### 3.4.1.1 Representação do Modelo Matemático por Diagrama de Blocos

Devido ao elevado número de componentes que integram o sistema, opta-se pelo uso dos diagramas de bloco para apresentar de maneira mais simplificada sua lógica operacional e a interconexão entre seus componentes. Assim, optou-se por esquematizar o sistema físico completo através de diagramas de blocos, como mostra a Figura 3.11. Este diagrama de blocos, para melhor entendimento, está reproduzido no Apêndice A do presente trabalho.

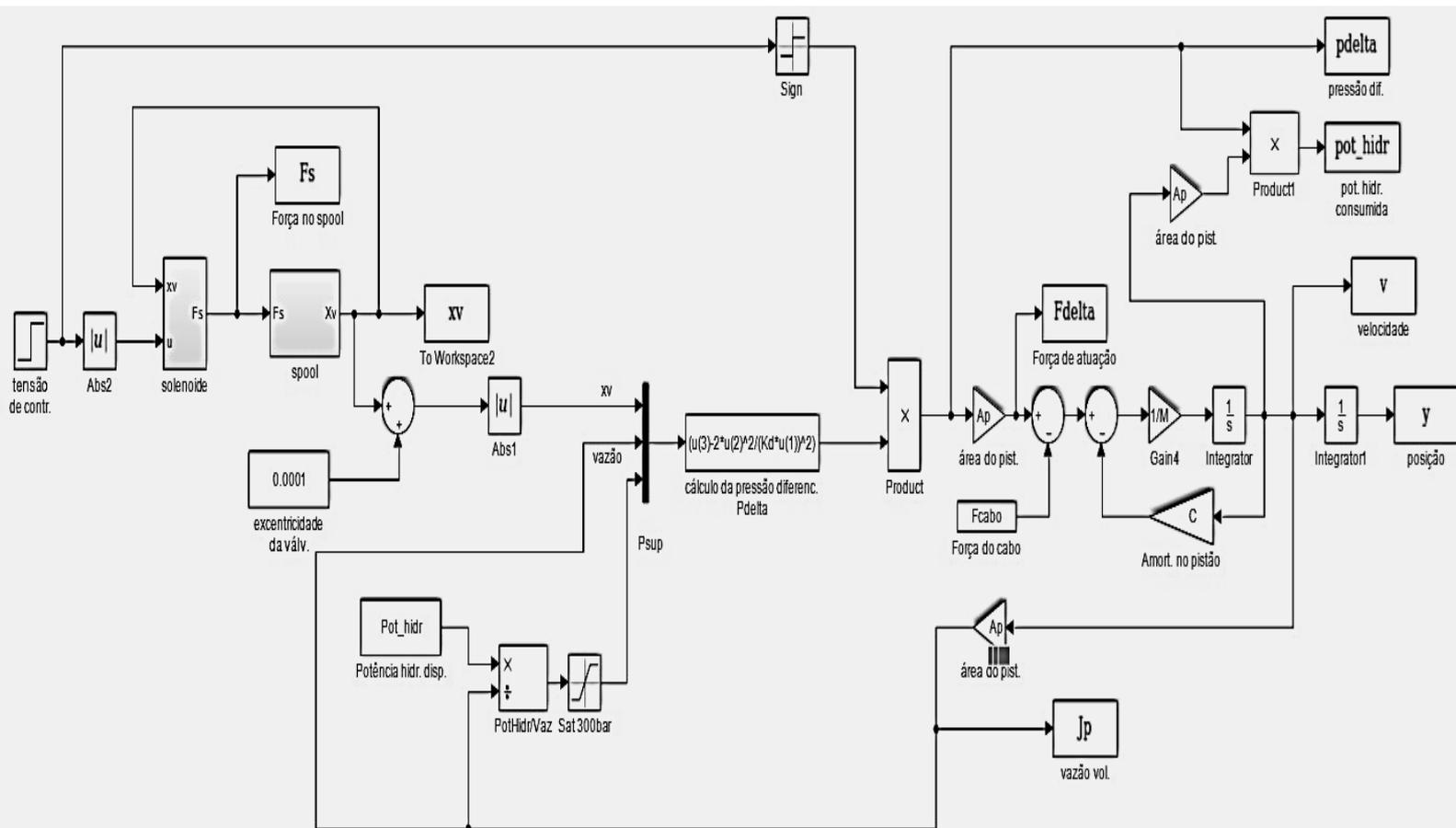


Figura 3.11: Representação do sistema físico da válvula através de um diagrama de blocos.

Conforme nota-se na Figura 3.12, os blocos relativos ao solenoide e ao *spool* são função do deslocamento e da força. Assim, seus blocos são representados separadamente. Nessa figura, no bloco relativo ao solenoide, é possível verificar-se que os dados obtidos pelo gráfico do catálogo do modelo comercial de solenoide selecionado para o projeto – os quais constam no Anexo B – os quais relacionam a força de atuação do solenoide com o deslocamento do *spool* ocasionado pela aplicação da própria força eletromagnética, em um processo iterativo, foram utilizados para montar uma tabela de interpolação (*look-up table*). Assim, para cada valor de entrada  $x_v$  do *spool* da válvula (que está conectado à parte móvel do solenoide) resulta em uma diferente força eletromagnética de atuação que faz com que, em um processo iterativo, o *spool* se desloque até encontrar uma posição de equilíbrio. A partir disso, é possível, estimar o valor de  $K_s$ , correspondente a mola de centragem da válvula, responsável por garantir o retorno do *spool* a sua posição inicial.

Por inspeção, é relativamente fácil identificar as equações (3.5) a (3.10) juntamente com as equações de equilíbrio dinâmico no *spool* da válvula e no pistão de atuação com carga externa

tomada como a força do cabo umbilical de energia e dados do robô, programadas nos diagramas de blocos apresentados nessa figuras.

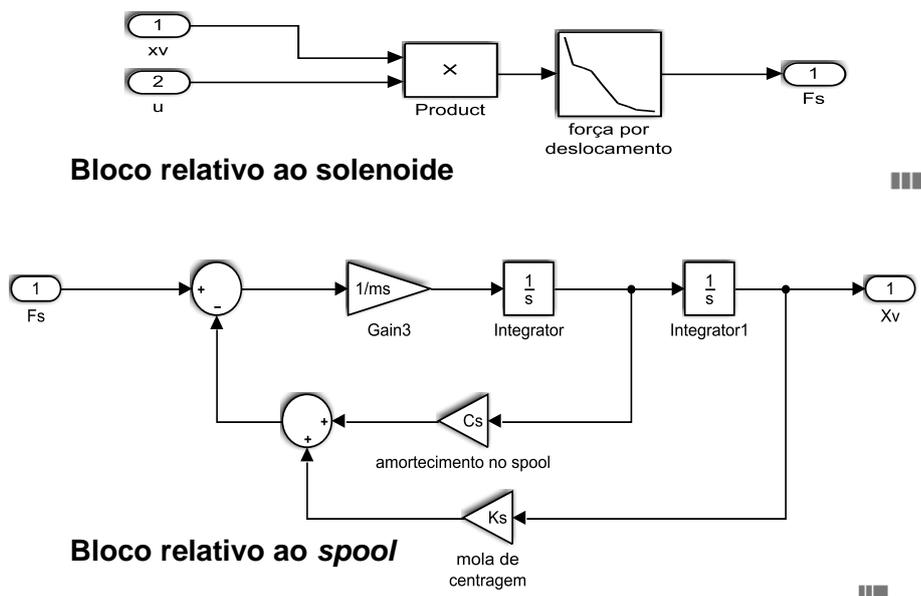


Figura 3.12: Representação dos diagramas de blocos do *spool* e do solenoide

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para obtenção dos resultados, reuniu-se os parâmetros usados como dados de entrada para a simulação, os quais são mostrados no Apêndice B.

Adotou-se como fluido de trabalho o óleo hidráulico ISO VG 68, utilizado com frequência em circuitos hidráulicos de alta pressão. Suas propriedades físicas utilizadas constam nos parâmetros de entrada. Os outros parâmetros, como o coeficiente de descarga  $C_d$  e o coeficiente de amortecimento viscoso equivalente  $C_s$  foram escolhidos a partir de consultas à bibliografia (Merrit, 1967) e análises empíricas via simulação. Assim, adotou-se  $C_d = 0,6$  e  $C = 1000 \text{ N.s/m}$ , que representam valores usuais para ambos:

### 4.1 Resultados das Simulações Numéricas

Ressalta-se o valor de  $K_s$  (rigidez de mola de centralização do *spool*) foi obtido por testes sucessivos e que este valor resultou em um valor de deslocamento do solenoide de 1,5 mm, correspondente ao curso de trabalho do mesmo. Este valor resulta em uma abertura da válvula perfeitamente condizente com a aplicação, conforme mostram os resultado das simulações apresentados mais adiante, neste mesmo capítulo.

Para a solução do conjunto de equações diferenciais ordinárias que representam o sistema, utilizou-se no ambiente Matlab/Simulink, o método de Runge-Kutta com um passo de integração fixo de 0,0001.

A simulação iniciou-se baseando-se em um catálogo de fabricante, conforme mencionado na explicação do diagrama de blocos, onde  $x_v = 1,5 \text{ mm}$  e a tensão no solenoide é 24V.

Inicialmente, obteve-se os resultados de força no solenoide e a posição do *spool* ao longo do tempo, conforme mostra a Figura 4.1, para comparação com a curva obtida no catálogo do fabricante (Anexo B).

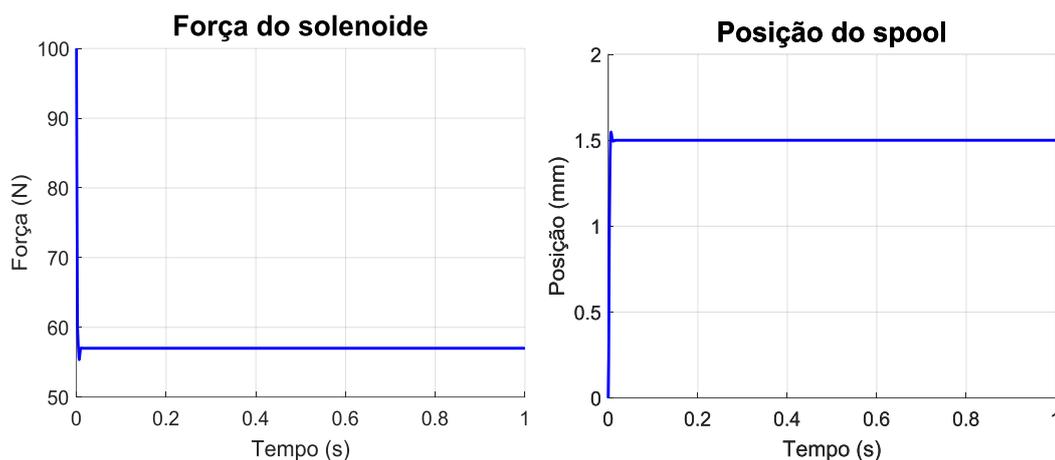


Figura 4.1 – Força aplicada ao solenoide e posição do *spool* após o acionamento do solenoide.

Com o valor da força do solenoide, obteve-se o valor da mola de centragem do *spool*:

$$K_s = 38000 \text{ N/m}$$

A partir da definição dos parâmetros referentes a válvula e o *spool*, é possível verificar o comportamento físico do sistema sob as condições de projeto.

Conforme enunciado nos requisitos de projeto requeridos, definiu-se previamente valores de vazão volumétrica para o cilindro principal e sua velocidade média de deslocamento. Essas condições são críticas quando a carga que o pistão movimenta atinge seu valor máximo, em torno de 2000 N. Explicitadas as condições de operação em conjunto com suas restrições, obtêm-se os valores de vazão volumétrica e de velocidade média de avanço do êmbolo que resultam das mudanças propostas para o modelo comercial. Esses resultados são mostrados conforme a Figura 4.2.

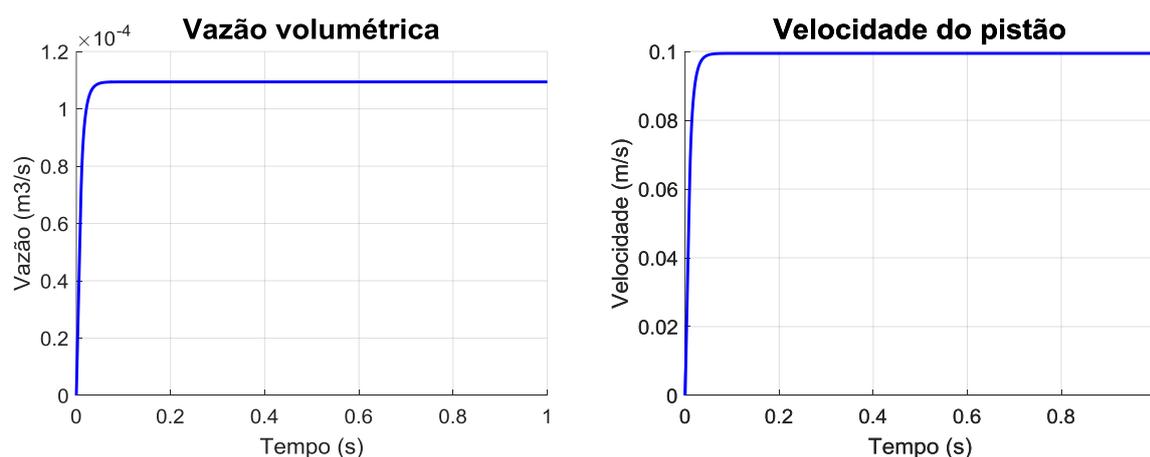


Figura 4.2 – Vazão volumétrica e velocidade de avanço associados ao movimento do êmbolo do sistema com carga máxima (massa do cabo = 2000Kg e força de arrasto = 2000N).

A partir da Figura 4.2 e das restrições do projeto obtém-se que:

$$v = 0,1 \text{ m/s} > v_{min} = 0,05 \text{ m/s}$$

$$J \approx 1,1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} > J_{min} = 5,9 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

## 5 CONCLUSÃO

As alterações propostas, a partir de um modelo comercial, para o conjunto formado pela válvula e pelo *spool* resultaram em um modelo que atende as restrições de funcionalidade e dimensionais requeridas pelo projeto *Annelida*. Visando uma futura possibilidade de implementação do modelo para o projeto, elaborou-se um modelo matemático para representar o comportamento físico da válvula usando parâmetros e restrições já estabelecidos. Os resultados obtidos via simulação mostraram que o modelo atende as necessidades do projeto, ressaltando-se a necessidade, posteriormente, de sua validação experimental.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akers, A., Gassman, M., Smith, R.; **“Hydraulic Power System Analysis”**, Taylor & Francis Group, 365p., 2006.

Exner, H., Freitag, R., Geis, H., Lang, R., Oppolzer, J., Schwab, P., Sumpf, E., Ostendorff, U., Reik, M.; **“Hidráulica Básica – Princípio Básico e Componentes da Tecnologia dos Fluidos Volume I”**, Rexroth Bosch Group, 3ª edição, 278p., 2002.

Fialho, A. B.; **“Automação Hidráulica – Projetos, dimensionamento e Análise de Circuitos”**, Editora Érica, 1ª edição, 260p., 2002.

Jun, L.; Sun, P.; Lian, L.; Qin, X. & Gong, Z., **“Improvement of characteristics of in-pipe micro robot”**, in Proc. Int. Symp. Micromechatronics, Human Science, pp. 153–156, 1999.

Linsingen, I. V.; **“Fundamentos de Sistemas Hidráulicos”**, Editora da UFSC, 3ª edição, 399p., 2001.

Merrit, H. E.; **“Hydraulic Control Systems”**, John Wiley & Sons Inc., 1st edition, 358p., 1967.

Modhaddam, M.M, Jerban, S., **“On The In-pipe Inspection Robots Traversing Through Elbows**, International Journal of Robotics, Vol. 4, No.2, 19-27, 2015.

Palmieri, A. C., **“Manual da Hidráulica Básica”**. Racine Hidráulica, 10ª edição, 326p., 1997.

Perondi, E. A.; **“Introdução ao Controle de Sistemas Mecânicos”**, Caderno Técnico, Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS, 3ª edição, 193p., 2010.

Suzumori, K, **“New Actuators and Their Applications: From Nano Actuators to Mega Actuators”**, Okayama University. Acesso em: [http://escholarship.lib.okayamau.ac.jp/mechanical\\_engineering/18](http://escholarship.lib.okayamau.ac.jp/mechanical_engineering/18)

Zarrouk, David; and Shoham, Moshe, **“Analysis and Design of One Degree of Freedom Worm Robots for Locomotion on Rigid and Compliant Terrain”** ASME Journal of Mechanical Design, Volume 134, Issue 2, (Feb 03, 2012) (9 pages) doi:10.1115/1.4005656

## APÊNDICE A: DIAGRAMA DE BLOCOS REFERENTE AO MODELO MATEMÁTICO DA VÁLVULA

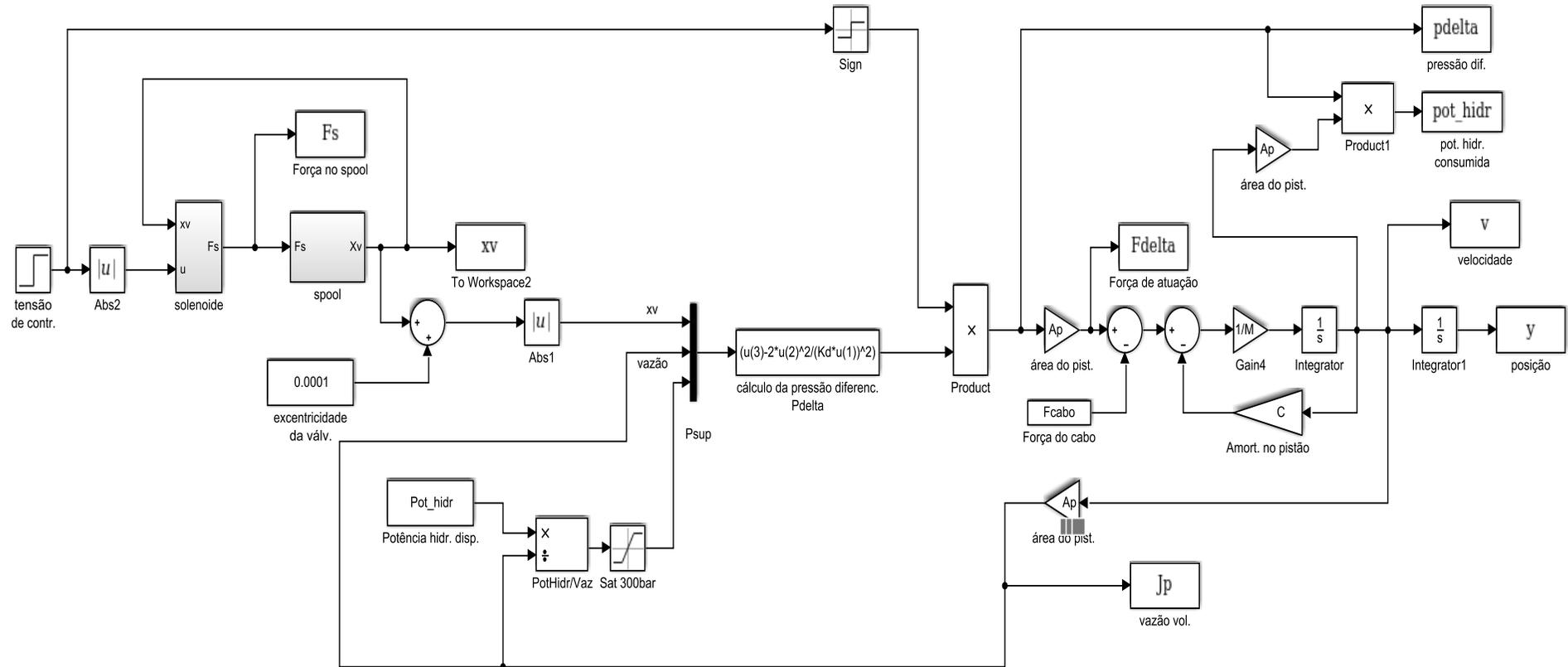


Figura A.1: Representação do diagrama de blocos do sistema físico da válvula

## APÊNDICE B: PARÂMETROS DE ENTRADA DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

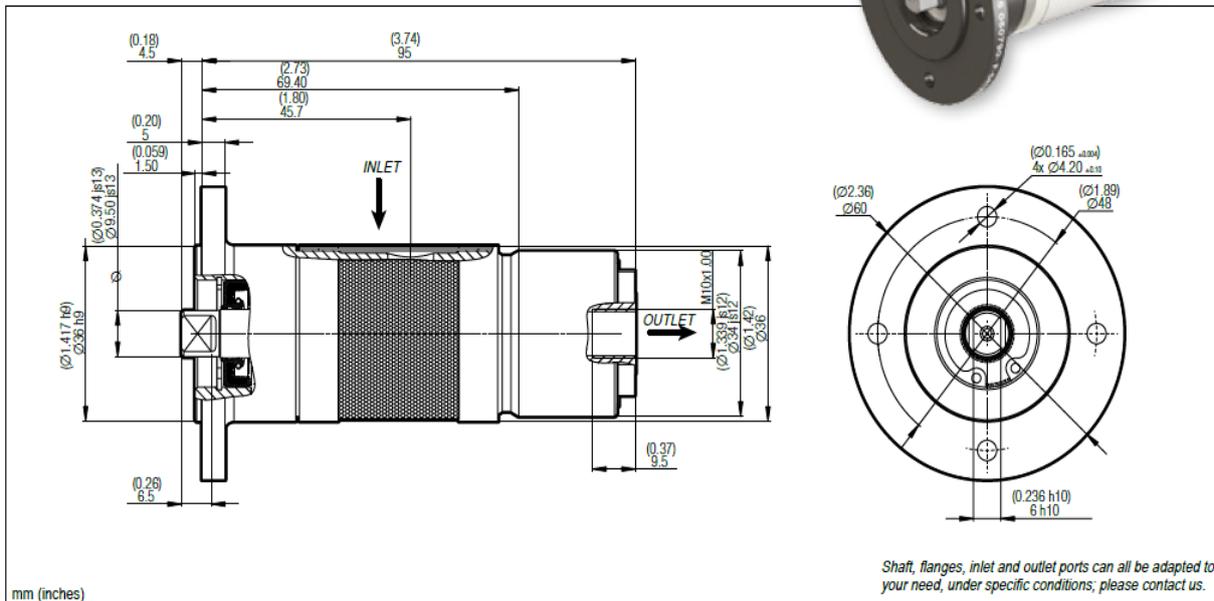
Os parâmetros de entrada para a simulação do modelo constam na Tabela B.1.

Tabela B.1: Parâmetros de entrada e seus valores, usados para a simulação do modelo matemático

Parâmetro	Valor
Massa do <i>spool</i> ( $m_s$ ) [kg]	0,1
Rigidez de mola do <i>spool</i> ( $K_s$ ) [N/m]	38000
Raio do <i>spool</i> ( $r$ ) [m]	0,005
Largura do orifício ( $l$ ) [m]	0,03
Massa específica do óleo ( $\rho$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	865
Coefficiente de descarga ( $C_d$ )	0,6
Constante do orifício ( $k_d$ ) [v(m <sup>3</sup> /kg)]	8,65E-04
Pressão de suprimento ( $P_{sup}$ ) [Pa]	300E+05
Coefficiente de amortecimento viscoso equivalente ( $C$ ) [Ns/m]	1000
Área do pistão ( $A_p$ ) [m <sup>2</sup> ]	0,0011
Massa total do cabo ( $M_{cabo}$ ) [kg]	2000
Massa do mecanismo de avanço ( $M$ ) [kg]	1,428
Força de arrasto no cabo ( $F_{cabo}$ ) N]	2000

## ANEXO A: MODELO DA BOMBA HIDRÁULICA ADQUIRIDA

### Fixed displacement micropumps PB36.5



#### ■ Characteristics

Type of pump	Displacement		Direction of rotation	Max. rotating speed (rpm)		Max. pressure				
	mm <sup>3</sup>	Cu.in		continuous	peak	continuous		peak		
						bar	PSI	bar	PSI	
PB36.5	050720	115	0.0070	CCW	5000	6000	300	4350	350	5075
	050790	280	0.0170	CW	5000	6000	300	4350	350	5075
	057310	360	0.0220	CCW	5000	6000	300	4350	350	5075

Fonte:

[http://www.hydroeduc.com/images/links/catalogues/hydro%20educ%20documentation\\_en/micro%20hydraulics/hydroeduc\\_micro\\_en.pdf](http://www.hydroeduc.com/images/links/catalogues/hydro%20educ%20documentation_en/micro%20hydraulics/hydroeduc_micro_en.pdf)

## ANEXO B: MODELO DO SOLENOIDE SELECIONADO

O modelo do solenoide escolhido é o Modelo: GHPY-37 da fabricante *Magnet-Schultz*. A Figura B.1 mostra a curva da força do solenoide pelo deslocamento do *spool*, para o modelo selecionado.

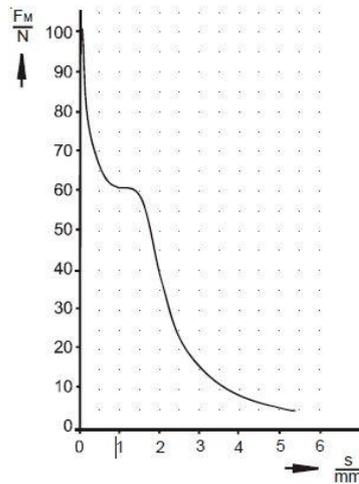


Figura B.1: Curva que mostra o comportamento da força do solenoide pelo deslocamento do *spool*. Fonte: <http://www.magnetschultz.co.uk/uploads/specifications/On,%20Off%20Solenoid%20for%20Hydraulic%20GHPY%20037,045,062.pdf>