

Monografia

Avaliação Experimental de um Controlador Fuzzy em um Sistema Eletro-Hidráulico

Jorge Luiz Matias de Lima

Natal, Junho de 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE – UFRN
CENTRO DE TECNOLOGIA – CT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – DEM
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM CONTROLADOR FUZZY EM UM SISTEMA
ELETRO-HIDRÁULICO**

JORGE LUIZ MATIAS DE LIMA

NATAL-RN
JUNHO/2014

JORGE LUIZ MATIAS DE LIMA

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM CONTROLADOR FUZZY EM UM SISTEMA
ELETRO-HIDRÁULICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof^o. Dr. Wallace Moreira Bessa

NATAL-RN
JUNHO/2014

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a minha família pelo apoio e suporte durante o curso de Engenharia Mecânica e durante a elaboração desse trabalho.

A Petrobras, por ter concedido a bolsa e financiado o trabalho durante os dois anos e ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo 14 da UFRN (PRH ANP - 14), que me orientou para a formação do trabalho.

Agradeço a todos os professores que com dedicação passaram todo o conhecimento que adquiri durante o curso de Engenharia Mecânica em especial ao Prof. Dr. Wallace Moreira Bessa pela paciência e atenção na orientação deste trabalho que tornou possível a realização do mesmo.

Também quero agradecer os meus amigos e colegas de curso que também contribuíram para este trabalho e durante todo o curso com apoio e conhecimento que foi absorvido por mim durante a graduação, em especial os colegas de laboratório George Oliveira de Araújo de Azevedo e João Deodato Batista dos Santos pela contribuição neste trabalho.

RESUMO

Sistemas eletro-hidráulicos são amplamente utilizados em aplicações industriais, tais como manipuladores robóticos, suspensões ativas, máquinas ferramentas de precisão e sistemas aeroespaciais. Eles oferecem muitas vantagens sobre os motores elétricos, incluindo alta força em relação ao peso, tempo de resposta rápido e tamanho compacto. No entanto, o controle preciso de sistemas eletro-hidráulicos, devido à sua inerente característica não linear, não pode ser facilmente obtido com os controladores lineares convencionais. Por isso este trabalho tem como objetivo a aplicação de um controlador puramente fuzzy baseado no estado do erro, em um sistema hidráulico real para possibilitar a avaliação de seu comportamento diante das não linearidades existentes.

Palavras: Atuador, Eletro-Hidráulico, Fuzzy, Válvula, Controlador.

ABSTRACT

Electro-hydraulic systems are widely used in industrial applications, such as robotic manipulator, active suspensions, precision machine tools and aerospace systems. They offer many advantages over electric motors, including high strength to weight ratio, fast response time and compact size. However, due to their inherent non-linear characteristic precise control of electro-hydraulic systems is not easily obtained with conventional linear controllers. Therefore this paper aims to apply a purely fuzzy controller based on the state of the error in a real hydraulic system to enable the evaluation of his behavior before the nonlinearities existing.

Keywords: Actuating, Electro-Hydraulic, Fuzzy, Valve, Controller.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Simbologia de válvulas direcionais.	4
Figura 2. Representação de um conjunto convencional e um conjunto difuso (Tanaka, 2011).	5
Figura 3. Função de pertinência Triangular.	6
Figura 4. Função de pertinência Trapezoidal.	6
Figura 5. Função de pertinência Gaussiana.	6
Figura 6. Conjuntos.	7
Figura 7. Operação de União.	7
Figura 8. Operação de Interseção.	7
Figura 9. Operação de Complemento.	8
Figura 10. Operação de Inclusão.	8
Figura 11. Diagrama esquemático de um sistema hidráulico (Bessa, Dutra e Kreuzer, 2010b).	9
Figura 12. Não-linearidade de zona-morta (Bessa, Dutra e Kreuzer, 2010b).	10
Figura 13. Bancada Eletro-Hidráulica Completa.	11
Figura 14. Unidade de Energia hidráulica (FESTO, 2014).	13
Figura 15. Atuador Hidráulico.	13
Figura 16. Válvula Proporcional (FESTO, 2014).	13
Figura 17. Cartão de Amplificação (FESTO, 2014).	13
Figura 18. Potenciômetro Linear modelo RP13/200-Li (FESTO, 2014).	14
Figura 19. Placa de aquisição de dados – USB-4711A (ADVANTECH, 2014).	14
Figura 20. Suporte do Sensor.	14
Figura 21. Guiar do Sensor.	14
Figura 22. Suporte.	15
Figura 23. Guia.	15
Figura 24. Sistema montado.	15
Figura 25. Universo de discurso do controlador Fuzzy.	16
Figura 26. Trajetória com frequência de 0.1rad/s	17

Figura 27. Erro para frequência de 0.1rad/s.....	17
Figura 28. Esforço de Controle para frequência de 0.1rad/s.....	18
Figura 29. Trajetória com frequência 0.5rad/s.....	18
Figura 30. Erro para frequência de 0.5rad/s.....	19
Figura 31. Esforço de Controle para frequência de 0.5rad/s.....	19
Figura 32. Trajetória com frequência 1.0rad/s.....	20
Figura 33. Erro para frequência de 1.0rad/s.....	20
Figura 34. Esforço de Controle para frequência de 1.0rad/s.....	20
Figura 35. Anomalia.	21
Figura 36. Ampliação.....	21

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. HIDRÁULICA	2
2.1. Fluidos Hidráulicos	2
2.2. Bombas	2
3. VÁLVULAS	3
3.1. Válvulas Limitadoras de Pressão, de Alívio ou de Segurança	3
3.2. Válvulas de Retenção	3
3.3. Válvulas de Controle de Fluxo	3
3.4. Válvulas Direcionais	3
4. LOGICA DIFUSA	5
5. MODELAGEM	9
5.1. Avaliação do modelo	10
6. BANCADA ELETRO-HIDRÁULICA	11
6.1. Sistema Eletro-Hidráulico	11
6.2. Sistema de Aquisição de Dados	13
6.3. Estrutura	14
7. EXPERIMENTOS	16
8. RESULTADOS E DISCURSÕES	17
9. CONCLUSÃO	22
REFERENCIAS	23
ANEXOS	25

1. INTRODUÇÃO

Sistemas hidráulicos tem diversas aplicações tanto na indústria petrolífera, automobilística, aeronáutica, robótica e metalomecânica. As principais características deste tipo de sistema são a capacidade de trabalhar com grandes cargas sem apresentar aquecimento como os atuadores elétricos, devido à baixa inércia dos fluidos esse tipo de sistema apresenta respostas rápidas e suaves a uma mudança de direção do movimento, uma alta relação entre força gerada pelo sistema e seu peso ou volume e além de ser um sistema de fácil montagem e proteção (Fialho, 2003, Fernandes, 2012, Lopes, 2010, Tanaka, 2011).

No entanto o controle do sistema eletro-hidráulico é muito difícil de se obter por apresentar um alto grau de não-linearidade, o que prejudica o desempenho dos controladores lineares e torna custosa a linearização desse tipo de sistema (Silva, 2004, Tanaka, 2011, Fernandes, 2012). Dentro das não-linearidade que esse sistema apresentar está uma conhecida como zona morta e a incompressibilidade do fluido (Bessa, Dutra e Kreuzer 2010b, Tanaka, 2011, Fernandes, 2012).

Devido aos controladores lineares não apresentarem uma perda de desempenho quando usados sistemas incertos como os sistemas hidráulicos vários trabalhos vêm sendo dedicados o estudo da aplicação de sistema de controles inteligentes ou controle não linear (Bessa, Dutra e Kreuzer, 2010b, Bessa, Dutra e Kreuzer, 2010c, Tanaka, 2011 e Fernandes, 2012).

Dentro das técnicas de controle inteligente (ou de Inteligência Artificial) podemos destaca a lógica fuzzy por sua facilidade de aplicação. Diversos trabalho tem usado a lógica fuzzy tanto para modelagem quanto para controle de sistemas incertos ou não (Klug e Castelan, 2012, Barbosa et al, 2011, Caldeira et al, 2001, Spatti et al, 2011), alguns trabalhos que usam o fuzzy, associam a uma outra técnica de controle para aumentar o desempenho do controlador (Bessa, Paula e Savi, 2009, Bessa e Barrêto, 2010, Bessa, Dutra e Kreuzer, 2010b, Bessa, Dutra e Kreuzer, 2010c).

O principal objetivo deste trabalho é aplicar um controlador fuzzy para analisar seu comportamento em um sistema real, pois a maioria dos trabalhos usados como referência se utilizam de técnicas de simulação numérica, que já estão bem consolidadas e apresenta desempenho satisfatório, porém não elimina ou substitui o uso de uma análise experimental na validação dos controladores. Um outro objetivo deste trabalho é estruturar uma bancada para avaliação experimental de controladores aplicados a sistemas hidráulicos semelhantes ao modelo matemático que será introduzido neste trabalho, e para que os trabalhos futuros possam utilizar o mesmo sistema será feita uma descrição detalhada de todas as características e aspetos construtivos relevantes de todos os equipamentos da bancada eletro-hidráulica.

2. HIDRÁULICA

É a ciência que estuda a utilização de líquidos confinados e sobre pressão para transmitir movimento e multiplicando forças. Uma desvantagem de sistemas hidráulicos em relação aos pneumáticos é a velocidade, pois para ganhar em força, perde-se em deslocamento. Porém uma vantagem desse sistema é o fato dos líquidos serem praticamente incompressíveis, o que causa a transmissão de movimento instantânea (Festo Didactic, 2001, Fialho, 2003, Macintyre, 2010).

2.1. Fluidos Hidráulicos

Os fluidos hidráulicos são óleos destilados do petróleo, sintéticos ou a base de água, as principais funções dos fluidos são transmissão de pressão, lubrificação das partes mecânicas do sistema, refrigeração do calor gerado nas transformações de energia, amortecimento de oscilações, proteção contra corrosão e remoção de impureza (Santos, 2007, Festo Didactic, 2001, Fialho, 2003, Macintyre, 2010).

2.2. Bombas

A bomba é provavelmente o componente mais importante e menos compreendido no circuito hidráulico. Sua função é a de converter a energia mecânica em energia hidráulica, empurrando o fluido hidráulico no circuito. As bombas são feitas em vários tamanhos e formas, mecânicas ou manuais com diversos mecanismos de bombeamento e para diversas aplicações. Todas as bombas, entretanto, são classificadas em duas categorias básicas: Turbo bombas (bombas centrífugas ou deslocamento dinâmico) ou bombas volumétricas (deslocamento positivo) (Santos, 2007, Festo Didactic, 2001, Fialho, 2003, Macintyre, 2010). Alguns tipos de bombas as quais são utilizadas na geração de energia hidráulica são:

- **Tipos de bombas de deslocamento positivo de vazão constante**
 - Manuais
 - Engrenagens
 - Parafusos
 - Palhetas
 - Pistões
 - Radiais
 - Axiais
- **Tipos de bombas de deslocamento positivo de vazão variável**
 - Manuais
 - Palhetas
 - Pistões
 - Radiais
 - Axiais

3. VÁLVULAS

3.1. Válvulas Limitadoras de Pressão, de Alívio ou de Segurança

A pressão máxima do circuito hidráulico pode ser controlada com o uso de uma válvula limitadora de pressão normalmente fechada. Com a via primária da válvula conectada à pressão do sistema, e a via secundária conectada ao tanque, o carretel no corpo da válvula é acionado por um nível predeterminado de pressão, e neste ponto as vias primária e secundária são conectadas, e o fluxo é desviado para o tanque (Festo Didactic, 2001, Fialho, 2003, Macintyre, 2010).

3.2. Válvulas de Retenção

As válvulas de retenção são aparentemente pequenas quando comparadas aos outros componentes hidráulicos, mas elas são componentes que possuem funções importantes e muito variadas. Uma válvula de retenção consiste basicamente de, corpo da válvula, vias de entrada e saída e de um assento móvel que é preso por uma mola de pressão (Festo Didactic, 2001, Fialho, 2003, Macintyre, 2010).

3.3. Válvulas de Controle de Fluxo

A função da válvula controladora de fluxo é a de reduzir a vazão em uma linha do circuito. Ela desempenha a sua função por ser uma restrição maior que a normal do sistema. Para vencer a restrição é necessária uma pressão maior provocando o desvio do fluxo para outra parte do circuito, ou promovendo a abertura da válvula limitadora de pressão deslocando o fluxo para o reservatório. São utilizadas quando se deseja controlar a velocidade em determinados atuadores (Festo Didactic, 2001, Fialho, 2003, Macintyre, 2010).

3.4. Válvulas Direcionais

Em sua grande maioria, os circuitos hidráulicos necessitam de meios para se controlar a direção e o sentido do fluxo de fluido. Através desse controle, pode-se obter movimentos desejados dos atuadores (cilindros, motores e osciladores hidráulicos, etc.), de tal forma que, seja possível efetuar o trabalho exigido. O processo mais utilizado para se controlar a direção e sentido do fluxo de fluido em um circuito, é a utilização de válvulas de controle direcional, comumente denominadas apenas de válvulas direcionais. Esses tipos de válvulas podem ser de múltiplas vias que, com o movimento rápido de um só elemento, controla a direção ou sentido de um ou mais fluxos diversos de fluido da válvula (Festo Didactic, 2001, Fialho, 2003, Macintyre, 2010).

Para identificação da simbologia das válvulas direcionais (ISO – ABNT) deve-se considerar Número de posições, Número de vias, Posição normal e Tipo de Acionamento. Os blocos (Figura 1) unidos representam o número de posições ou manobras distintas que uma válvula pode assumir.

Deve-se saber que uma válvula direcional possui no mínimo dois quadrados, ou seja realiza pelo menos duas manobras. O número de vias corresponde ao número de conexões úteis que uma válvula pode possuir, podem ser vias de passagem ou vias de bloqueio ou a combinação de ambas. A posição normal de uma válvula de controle direcional é a posição em que se encontram os elementos internos quando a mesma não foi acionada, geralmente é mantida por força de uma mola (Festo Didactic, 2001, Fialho, 2003, Macintyre, 2010).

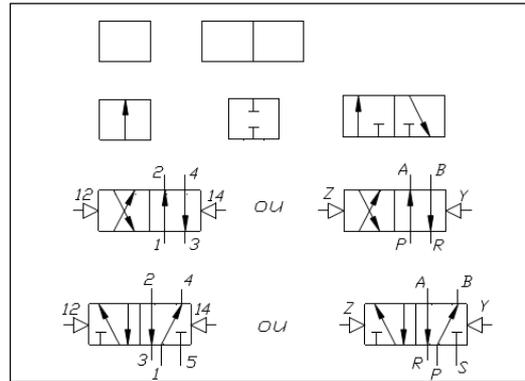


Figura 1. Simbologia de válvulas direcionais.

4. LOGICA DIFUSA

A lógica fuzzy ou lógica difusa ou logica nebulosa é baseada na teoria dos conjuntos fuzzy, que foi desenvolvida em 1965 pelo engenheiro e matemático Latfi A. Zadeh para suprir necessidade de automatização de problemas tecnológicos os quais apresentam ambiguidade, os quais são incapazes de serem tratados computacionalmente através da lógica booleana que está baseada na lógica clássica (Sivanandam et al, 2007, Tanaka, 2011, Gomide e Gudwin, 1994).

Na lógica clássica só existem duas classificações “verdadeiro” ou “falso”, ou seja, na teoria dos conjuntos clássicos a pertinência de um dado elemento a um conjunto só possui duas classificações, pertence ou não pertence ao referido conjunto, além disso o elemento não pode pertencer a mais de um conjunto (Tanaka, 2011, Jafelice, 2012, Rignel, Checi, e Lucas, 2011, Belchior, 1997).

Na lógica difusa existem vários *graus de verdade*, ou seja, na teoria dos conjuntos fuzzy o grau de verdade ou pertinência é dado por uma função $\mu_A: U \rightarrow [0,1]$ aonde um elemento x tem um grau de pertinência $\mu_A(x)$ ao uma dado subconjunto A , onde esse pertinência pode variando de 0 a 1, dando uma suavidade na transição entre dois estados como podemos observa na Figura 2, aonde temos a função μ_c de um subconjunto clássico e a função μ_f de um subconjunto fuzzy. Além disso um mesmo elemento pode ter diferentes graus de pertinências em diferentes subconjuntos fuzzy ao mesmo tempo (Rignel, Checi, e Lucas, 2011, Tanaka, 2011, Jafelice, 2012).

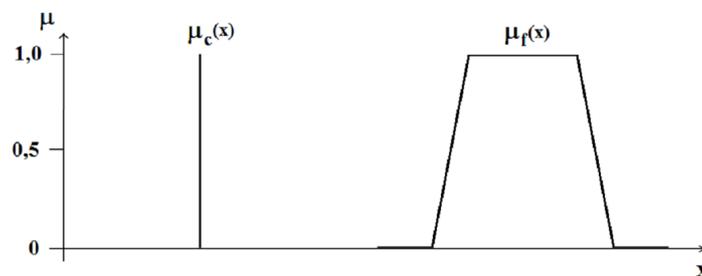


Figura 2. Representação de um conjunto convencional e um conjunto difuso (Tanaka, 2011).

A lógica fuzzy tem a capacidade de tratar problemas de forma aproximada ao raciocínio humano, tornando a classificação de elemento de conjunto fuzzy menos rígida que a classificação pela teoria clássica (Belchior, 1977, Tanaka, 2011, Jafelice, 2012). A lógica fuzzy permite a utilização de expressões com “muito”, “pouco”, “talvez”, “entorno de”, “provável” e outras que são comuns em tomadas de decisões humanas, são chamadas de *Variáveis Linguísticas* (Rignel, Checi, e Lucas, 2011, Tanaka, 2011, Jafelice, 2012).

As funções de pertinências mas utilizadas são as seguintes.

- Triangulares: $\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right)$, onde $a < b < c$ representam os vértices do triângulo (ver Figura 3).

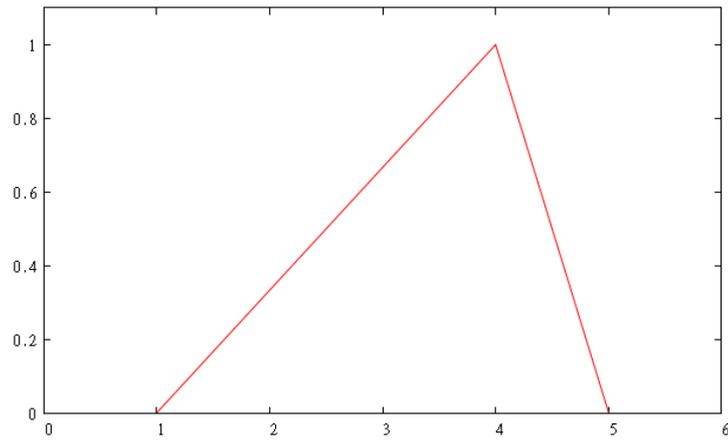


Figura 3. Função de pertinência Triangular.

- Trapezoidal: $\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right)$, onde $a < b < c < d$ representam os vértices do trapézio (ver Figura 4).

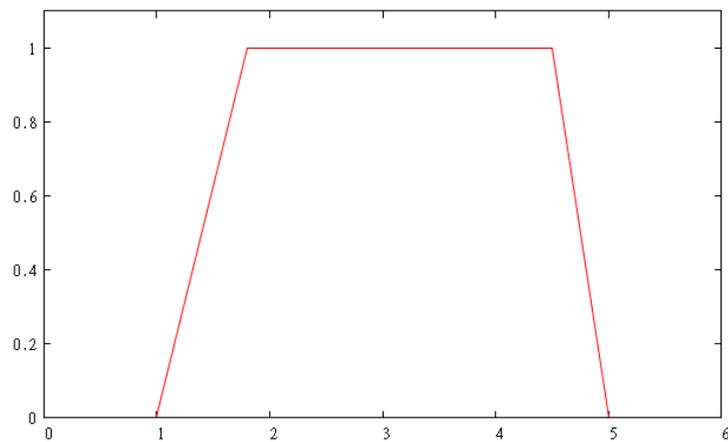


Figura 4. Função de pertinência Trapezoidal.

- Gaussiana: $\mu(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}$, onde c é o valor do centro e σ determina a largura da função (ver Figura 5).

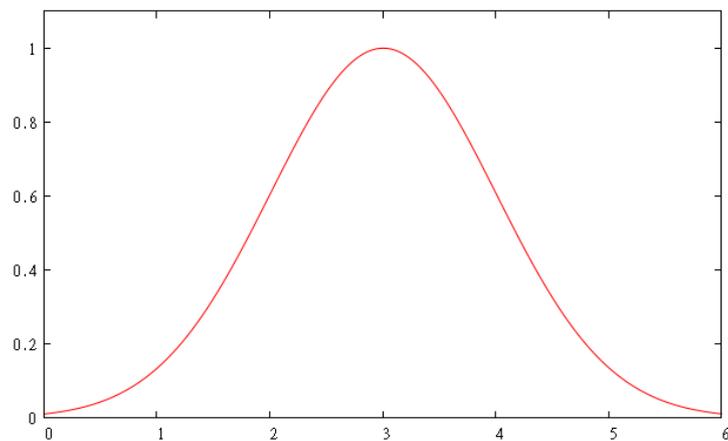


Figura 5. Função de pertinência Gaussiana.

Os conjuntos fuzzy possuem as mesmas operações básicas que os conjuntos clássicos. Considerando dois conjuntos fuzzy A e B (ver Figura 6) em um universo U .

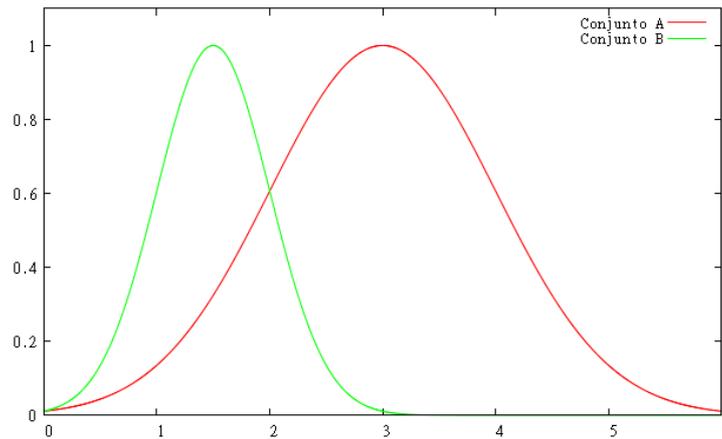


Figura 6. Conjuntos.

- União: $C = A \cup B \leftrightarrow \mu_c = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$ (Figura 7)

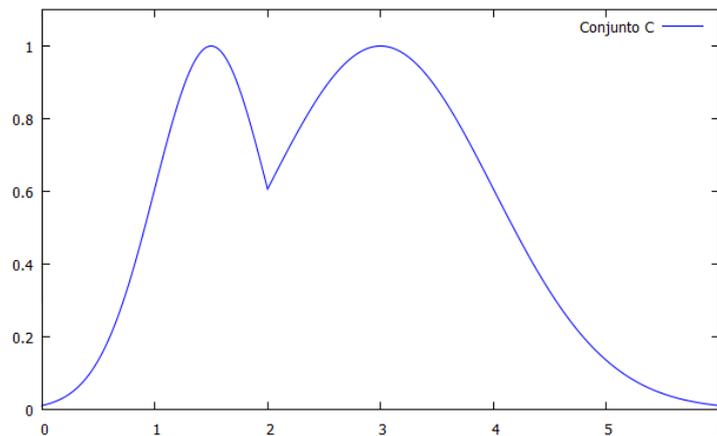


Figura 7. Operação de União.

- Interseção: $C = A \cap B \leftrightarrow \mu_c = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x)$ (ver Figura 8)

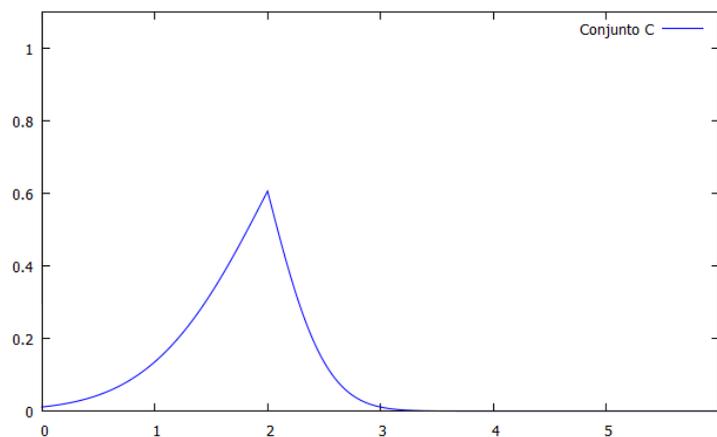


Figura 8. Operação de Interseção.

- Complemento: $C = A' \leftrightarrow \mu_c = \mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x)$ (ver Figura 9)

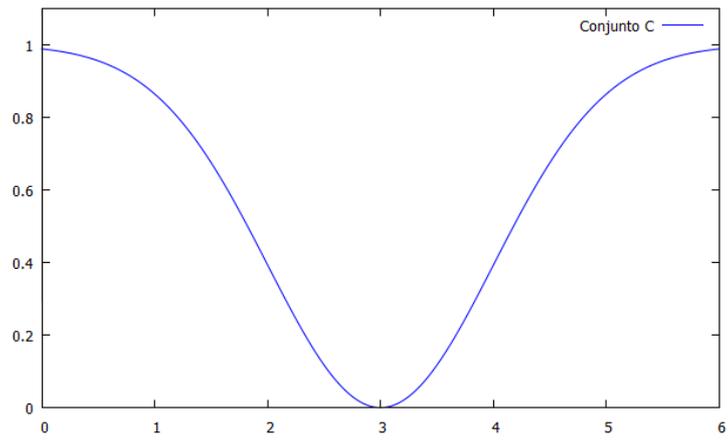


Figura 9. Operação de Complemento.

- Inclusão: $A \subseteq B \leftrightarrow \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ (ver Figura 10).

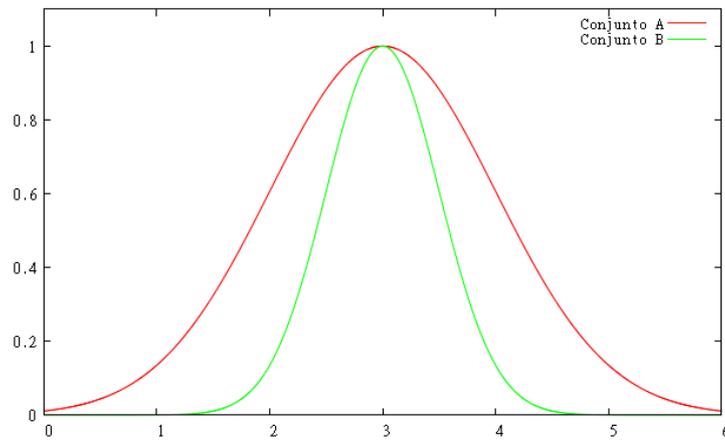


Figura 10. Operação de Inclusão.

5. MODELAGEM

No intuito de projetar um controlador para um sistema atuado eletro-hidraulicamente, deve-se em primeiro lugar desenvolver um modelo matemático que represente o comportamento dinâmico do sistema. Modelos dinâmicos para sistemas eletro-hidráulicos podem ser facilmente encontrados na literatura (Merrit, 1967; Bessa, Dutra e Kreuzer, 2010b; Bessa, Dutra e Kreuzer, 2010c).

Seja, por exemplo, um sistema eletro-hidráulico formado por uma válvula proporcional e um cilindro hidráulico submetido a um carregamento dinâmico variável. O carregamento variável pode ser representado por um sistema massa-mola-amortecedor, conforme apresentado na Figura 11.

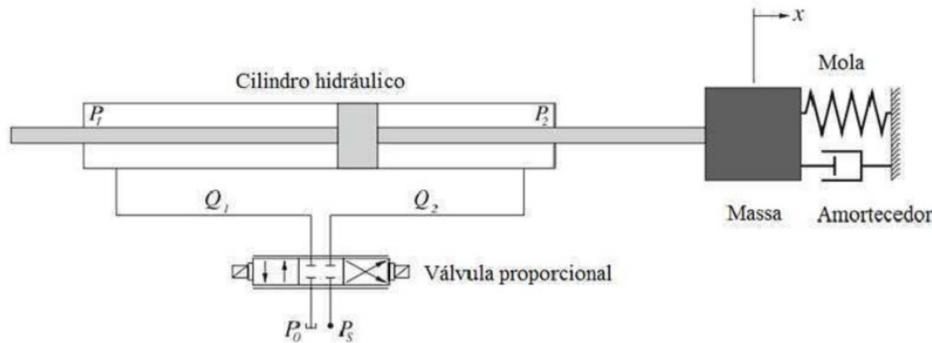


Figura 11. Diagrama esquemático de um sistema hidráulico (Bessa, Dutra e Kreuzer, 2010b).

Neste caso, o equilíbrio dinâmico de forças no pistão é dado pela Equação (1):

$$F_g = A_1 P_1 - A_2 P_2 = M_t \ddot{x} + B_t \dot{x} + K_s x \quad (1)$$

onde F_g é a força produzida pelo pistão, P_1 e P_2 são as pressões atuantes nas câmaras do cilindro, A_1 e A_2 são as áreas do pistão, M_t é a massa total do pistão e da carga, B_t é o coeficiente de atrito viscoso do sistema, K_s é constante elástica da mola e x representa o deslocamento do pistão .

Assim, definindo $P_l = P_1 - P_2$ e $A_p = A_1 = A_2$, obtém-se na Equação (2):

$$M_t \ddot{x} + B_t \dot{x} + K_s x = A_p P_l \quad (2)$$

Deste modo, aplicando-se a equação da continuidade na Equação (2), a Equação (3) é obtida:

$$Q_l = A_p \dot{x} + C_{tp} P_l + \frac{V_t}{4\beta_e} \dot{P}_l \quad (3)$$

onde C_{tp} é o coeficiente de vazamento do pistão, V_t é o volume total sob compressão e β_e é o módulo de elasticidade volumétrico do fluido.

No caso de uma válvula com orifícios simétricos, a equação (4) para Q_l é dada por:

$$Q_l = C_d w \bar{x}_{sp} \sqrt{\frac{1}{\rho} (P_s - \text{sgn}(\bar{x}_{sp}) P_l)} \quad (4)$$

onde C_d é o coeficiente de descarga, x_{sp} representa o deslocamento do cilindro da válvula, w o gradiente de área do orifício da válvula, ρ é densidade do fluido hidráulico e P_s é a pressão fornecida ao sistema.

5.1. Avaliação do modelo

No entanto, deve-se ressaltar que a adoção de um modelo de parâmetros concentrados para representar um sistema contínuo, como o escoamento do fluido no sistema, por exemplo, acarreta em incertezas ao modelo matemático. Além disso, mesmo este modelo simplificado está sujeito a presença de não-linearidades não diferenciáveis, como por exemplo, uma não-linearidade de zona-morta na entrada (Figura 12), que podem comprometer seriamente o desempenho do controlador.

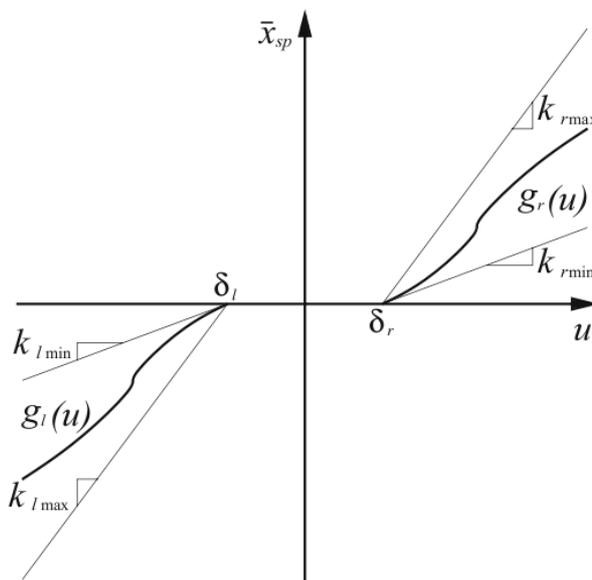


Figura 12. Não-linearidade de zona-morta (Bessa, Dutra e Kreuzer, 2010b).

Deste modo, pode-se empregar algoritmos baseados na lógica difusa para reconhecer as incertezas e não-linearidades associadas ao comportamento dinâmico deste sistema eletro-hidráulico. Recentemente, diversos trabalhos (Bessa & Barrêto, 2010a; Bessa, Dutra e Kreuzer, 2010a) têm apresentado resultados bastante satisfatórios ao utilizar a lógica difusa na modelagem e controle de sistemas não-lineares incertos.

6. BANCADA ELETRO-HIDRÁULICA

Neste capítulo iremos descrever os principais equipamentos que compõem a bancada eletro-hidráulica, apresentando algumas de suas características e aspectos construtivos.



Figura 13. Bancada Eletro-Hidráulica Completa.

6.1. Sistema Eletro-Hidráulico

O sistema eletro-hidráulica completo é mostrada na Figura 13, ele é composto pelos seguintes equipamentos.

- **Unidade de Energia Hidráulica** (Figura 14): é composta por um reservatório de fluido hidráulico com capacidade de 40 litros, sendo fluido hidráulico utilizado ISO VG 46, um motor elétrico de 2CV, 127/220V e 60Hz, acoplado a uma bomba de engrenagens com deslocamento fixo e saída independente com vazão de 10 Litros/min, a pressão de operação é 60 bar e pressão máxima de 100 bar, um manômetro com duas escalas de fundo (bar e psi), um válvula reguladora de pressão além de algumas conexões de engate rápido, sedo 4 tomadas de pressão, 4 drenos e 4 de retornos de fluido para o reservatório.
- **Cilindro Hidráulico** (Figura 15): o atuador tem dupla atuação com um curso de 200mm, 40mm de diâmetro, tem pressão de trabalho de 60bar e pressão máxima de 100bar. Além disso possuindo também o mesmo tipo de engates rápido já mencionados anteriormente.
- **Válvula Proporcional** (Figura 16): uma servoválvula de 4/3 vias que tem atuação proporcional, ou seja, ela é usada para controle direcional do fluido bem como o controle de vazão do mesmo, o acionamento da válvula é feito através de dois solenoides, já a posição normal do carretel (centro da válvula) é mantida através de molas. Os solenoides são alimentados com

uma tensão de 24V CC e a corrente pode variar entre 0 – 800mA dependendo da abertura desejada do orifício de passagem do fluido. As conexões da válvula são de engates rápidos, do mesmo tipo do cilindro e da unidade hidráulica, a pressão de trabalho e máxima também são as mesmas, ou seja, 60 e 100bar respectivamente.

- **Cartão de Amplificação** (Figura 17): é o equipamento responsável por receber o sinal de tensão e transforma-los em um sinal de corrente adequado para a atuação das bobinas da eletroválvula. O cartão possui dois canais de saída os quais são projetados para operar em duas configurações, dois canais independentes ou trabalha com válvulas de duplo solenoide, como por exemplo a válvula proporcional utilizada nesse trabalho. Opcionalmente o cartão pode funcionar como dois aplicadores de um canal cada ou um único amplificador de canais. O cartão de amplificação pode receber externamente ou internamente os valores de setpoint (valor alvo) que podem variar de -10V a +10V com um incremento de 0.1V. Os valores de setpoint internos são ativados pelas entradas INT W1 ou INT W2, se uma tensão de 24V DC for aplicada a uma destas entradas, então um LED (Light Emission Diode ou Diodo emissor de Luz) acenderá indicando a ativação. Já os valores de setpoint externos seguem as seguintes regras:

Para 1 amplificador de 1 canal:	Para um Setpoint em W1, 0 – +10, saída A é ativado Para um Setpoint em W2, 0 – +10, saída B é ativado
Para 1 amplificador de 2 canal:	Para um Setpoint em W1, 0 – +10, saída A é ativado Para um Setpoint em W1, 0 – -10, saída B é ativado O valor de W2 é desconsiderado.

As correntes de magnetizações nas saídas podem ser de 3 tipos corrente de base, corrente de salto ou corrente dependente do valor de setpoint a qual pode variar de 100mA a 1A com incremento de 5mA. A corrente de base não depende do valor de setpoint, pois possui um valor próprio que pode variar de 0 a 250mA com incremento de 1mA. A corrente de salto depende da polaridade do valor de setpoint, pois no caso de 1 amplificador de 2 canais em uso o valor positivo do setpoint caso um aumento brusco da corrente na saída A e o valor negativo do setpoint caso um aumento brusco da na saída B, a corrente de salto pode variar de 0 a 250mA. O cartão é alimentado por uma tensão de 24V CC e possui uma chave seletora e um botão rotativo para configuração.



Figura 14. Unidade de Energia hidráulica (FESTO, 2014).



Figura 15. Atuador Hidráulico.



Figura 16. Válvula Proporcional (FESTO, 2014).



Figura 17. Cartão de Amplificação (FESTO, 2014).

Além destes equipamentos acima descritos, o sistema conta com alguns outros acessórios como cabos para as ligações elétricas, mangueiras hidráulicas flexíveis com engates rápidos e uma fonte de tensão contínua de 24V, todos esses equipamentos são da linha didática da FESTO.

6.2. Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados é composto por um sensor do tipo potenciômetro deslizante linear para medir a posição do atuador e uma placa de aquisição de dados que servirá de interface com um computador, a seguir serão apresentados estes equipamentos e suas especificações.

- **Potenciômetro linear** (Figura 18): o sensor de posição modelo RP13/200-Li tem um curso de 200mm e entrega um sinal de tensão em sua saída com um range de 0 a 10V CC, possui tolerância de linearidade de 0,5%, uma classe de proteção IP 64 e pode ser alimentado com uma tensão de 13 - 30V DC.
- **Placa de Aquisição de Dados** (Figura 19): o módulo de aquisição de dados multifuncional portátil da ADVANTECH modelo USB-4711A está equipado com diversos recursos dentre eles estão, 8 entradas digitais, 8 saídas digitais, 16 entradas analógicas de terminal único ou 8 entradas diferenciais (dependendo da programação do software) com 12bits de resolução, 2 saídas analógicas com resolução de 12bits e um taxa de amostragem de 150kS/s. As 8 entradas analógicas podem ser bipolares de $\pm 10V$, $\pm 5V$, $\pm 2,5V$, $\pm 1,25V$ e $\pm 0.625V$, já as 2 saídas analógicas podem ser unipolares de 0 a 5V e 0 a 10V ou bipolares $\pm 10V$ e $\pm 5V$. Esta placa de

aquisição de dados conta com um rico conjunto drivers de DLL e uma biblioteca completa de funções I/O que permite diversas aplicações de software no mais variados tipos de linguagens, como por exemplo C++, C#, Delphi, Java e Basic, a comunicação entre o modulo e um computador é feita através de uma porta UBS 2.0 a qual também serve como fonte de alimentação.



Figura 18. Potenciômetro Linear modelo RP13/200-Li (FESTO, 2014).



Figura 19. Placa de aquisição de dados – USB-4711A (ADVANTECH, 2014).

Os sinais de tensão (0~10V) proveniente do sensor de posição são lidos pela a placa de aquisição, que os convertem de sinal analógico para digital, e então são enviados para o computador usando uma porta USB, esses dados então são convertidos em posição (de 0 a 200mm) através de uma curva de calibração do sensor previamente estabelecida.

6.3. Estrutura

Durante a montagem da bancada houve a necessidade da concepção de um mecanismo para acoplar o sensor de posição linear ao atuador hidráulico do sistema. Assim foram idealizadas as seguintes peças: um suporte para fixação do sensor ao corpo do atuador, mostrado na Figura 20, e um guia para que a haste do sensor seja arrastada junto com o êmbolo do cilindro hidráulico (Figura 21).

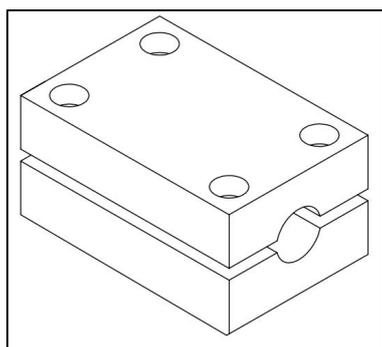


Figura 20. Suporte do Sensor.

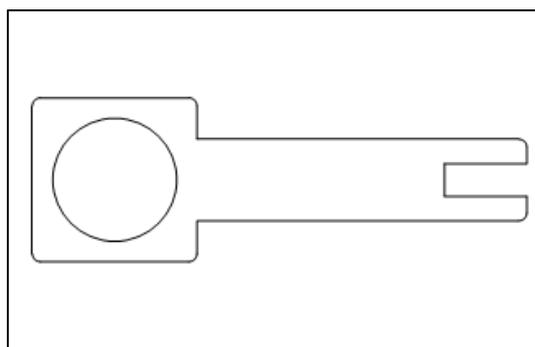


Figura 21. Guiar do Sensor.

Na Figura 22 mostra o suporte fabricado para o sensor e montado e Figura 23 mostra a peça que servirá como guia do sensor de posição, na Figura 24 é apresentado o sistema sensor/atuador montado. Mais detalhes sobre o desenho das peças podem ser vistos em anexo.



Figura 22. Suporte.



Figura 23. Guia.



Figura 24. Sistema montado

7. EXPERIMENTOS

Os experimentos consistem em fazer o controle de posição do atuador hidráulico em uma trajetória predeterminada, essa trajetória é definida por uma função senoidal. A Equação (5) apresenta a função de referência utilizada nos experimentos.

$$x_{ref} = \hat{A} * \sin(\omega t) + x_0 \quad (5)$$

Onde:

x_{ref} → é a posição de referência ou a posição desejada;

\hat{A} → e a amplitude da função seno;

ω → é a frequência;

x_0 → é a posição do centro da função;

t → é o tempo.

Para que os experimentos pudessem ser melhor comparados os seguintes valores foram adotados: $\hat{A} = 0.1m$, $x_0 = 0.1m$ e ωt variando de 0 a 6π . A frequência foi a variável escolhida para ser usada como parâmetro entre os experimentos, pois se mostrou em experimentos preliminares como sendo o fator de maior influência no desempenho do controlador, devido a limitações físicas da própria planta que não permite grandes velocidade, fatos que iremos demonstrar em seguida.

O controlador fuzzy foi implementado utilizando a linguagem de programação C, por sua flexibilidade e versatilidade além de existir grande suporte para ela. O controlador fuzzy utiliza o seguinte universo de discurso apresentado na Figura 25, o qual possui cinco funções de pertinências.

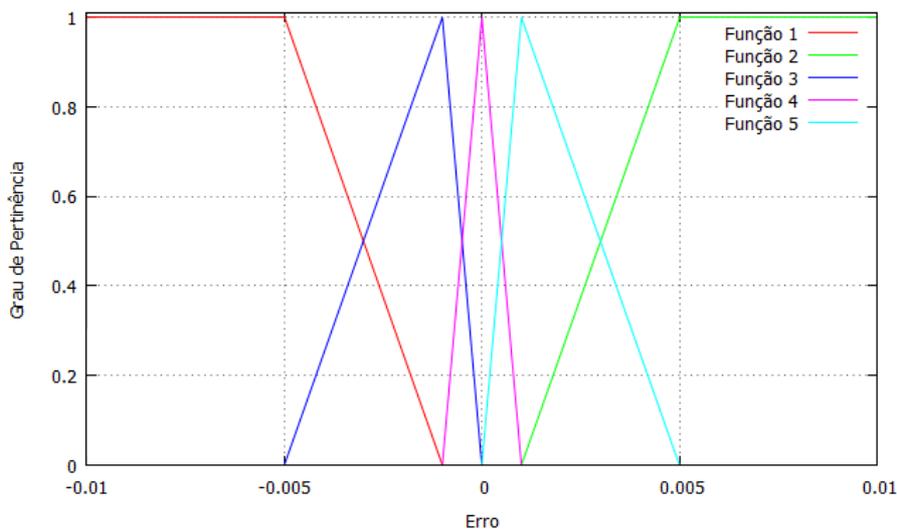


Figura 25. Universo de discurso do controlador Fuzzy.

8. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizados diversos experimentos utilizando o controlador fuzzy aplicado a bancada eletro-hidráulica, porém apenas os mais significativos e representativos resultados foram selecionados para serem apresentados neste trabalho. Os principais parâmetros analisados foram o esforço de controle exercido pelo controlador, o erro de posição e se a trajetória pré-determinada foi rastreada, todos estes parâmetros são diretamente afetados pela frequência da função de referência.

Para uma frequência de 0.05rad/s controlador obteve um comportamento satisfatório no que se refere ao rastreamento da trajetória (ver Figura 26), o que pode ser confirmado observado o gráfico da Figura 27 em que o erro de posição sempre encontra-se próximo de zero e entre $\pm 0.005\text{m}$. um outro bom resultado obtido está no esforço de controle que permanece em torno de $\pm 3\text{V}$ (ver Figura 28).

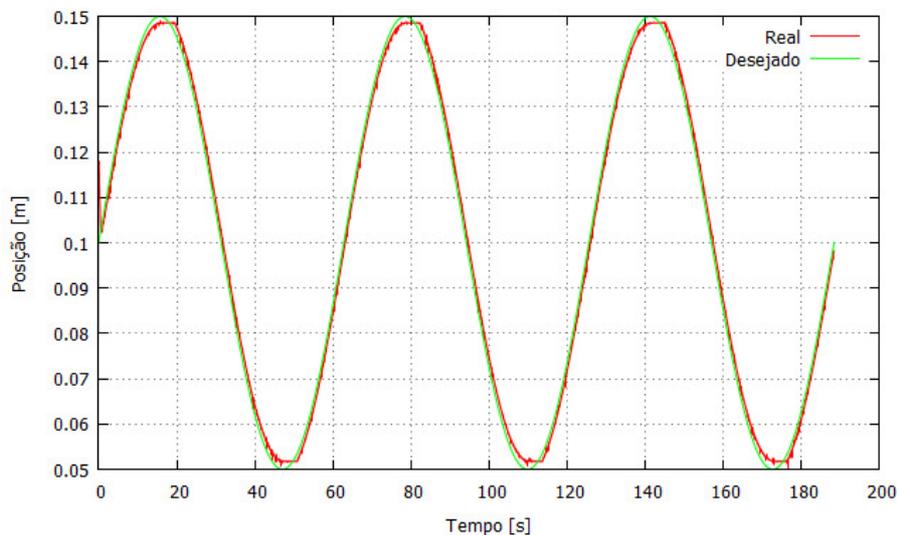


Figura 26. Trajetória com frequência de 0.1rad/s

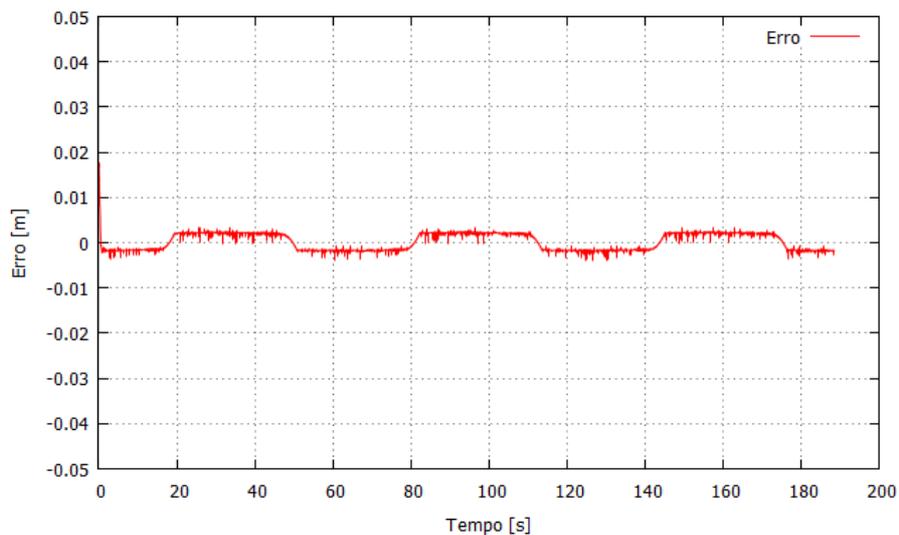


Figura 27. Erro para frequência de 0.1rad/s .

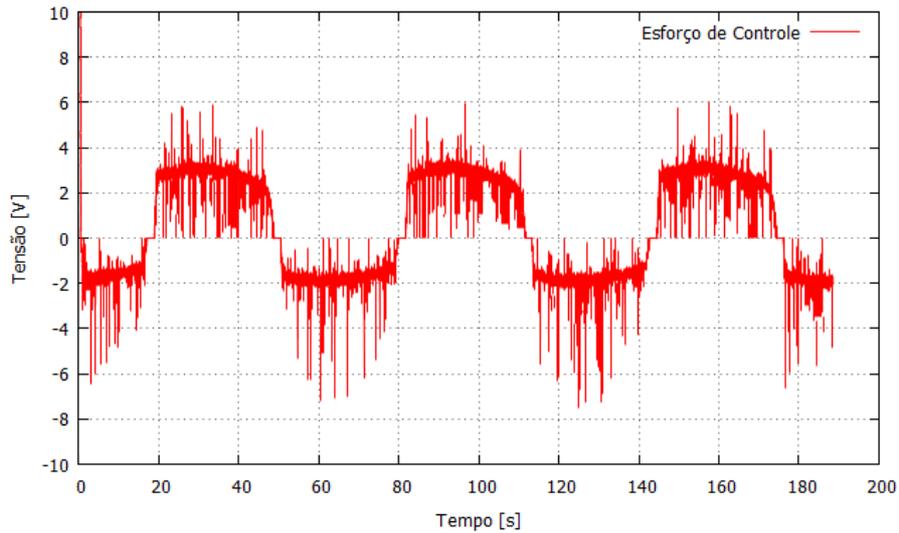


Figura 28. Esforço de Controle para frequência de 0.1rad/s

Os bons resultados repetiram-se até um frequência entorno de 0.5rad/s , já que foi observado que no experimento para a frequência de 0.5rad/s controlador obteve um comportamento também satisfatório no que se refere ao rastreamento da trajetória (ver Figura 29), o que pode também ser observado no gráfico da Figura 30 em que o erro de posição sempre encontra-se próximo de zero, entre $\pm 0.005\text{m}$. Entretanto o resultado obtido no esforço de controle já não foi tão satisfatório, pois o esforço dobra ficam em valores em torno de $\pm 6\text{V}$ (ver Figura 31).

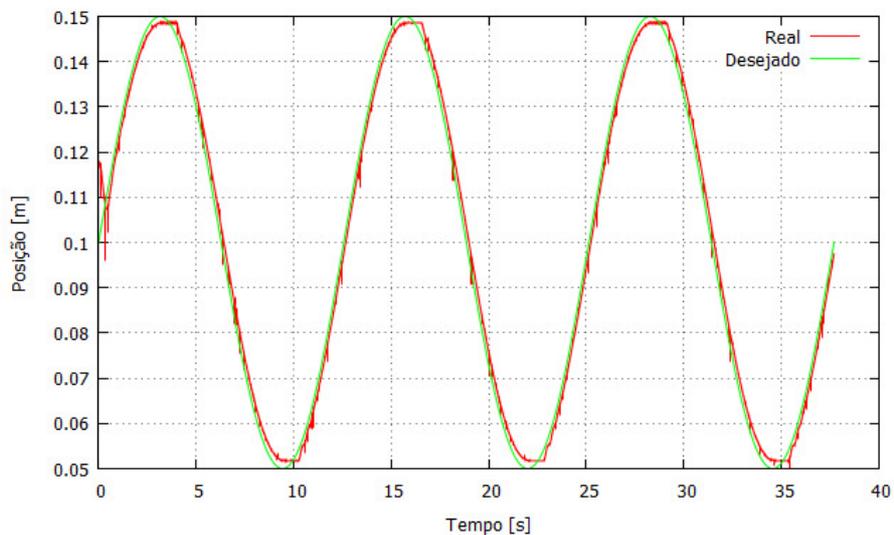


Figura 29. Trajetória com frequência 0.5rad/s.

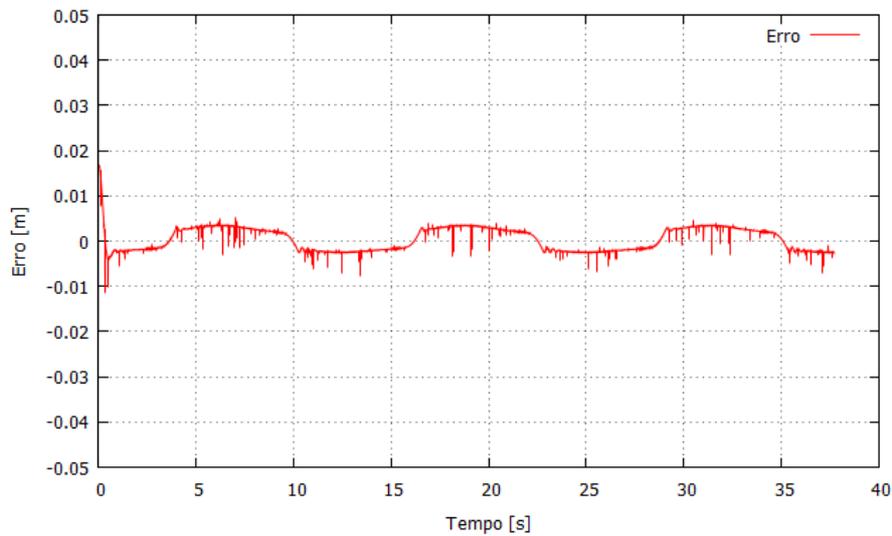


Figura 30. Erro para frequência de 0.5rad/s.

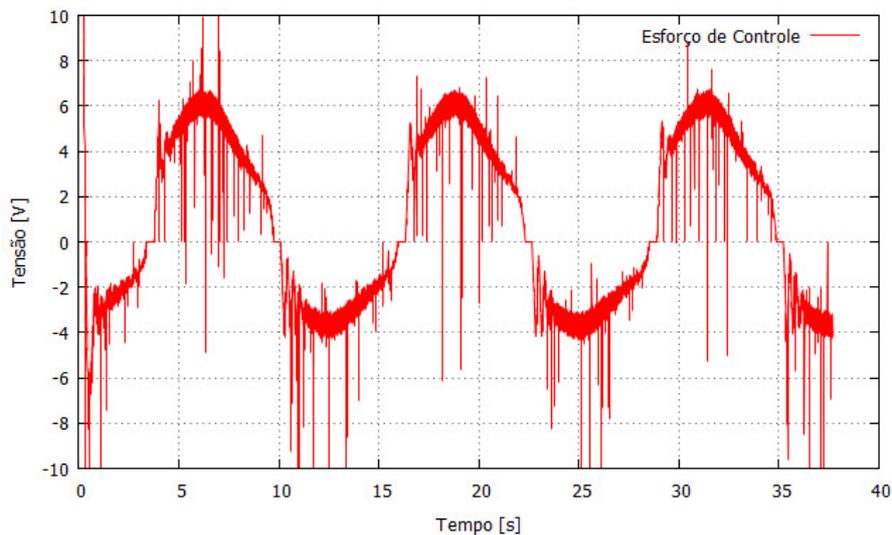


Figura 31. Esforço de Controle para frequência de 0.5rad/s.

Para uma frequência de 1.0rad/s controlador já apresenta um comportamento totalmente desfavorável no que se refere ao rastreamento da trajetória, pois a curva em vermelho que indica a posição real do atuador apresenta uma forma triangular como podemos notar na Figura 32, com isso o erro de posição aumentou drasticamente para valores que ficam próximos a $\pm 0.02\text{m}$ (ver Figura 33). Devido ao aumento no erro o controlador tentou compensar aumentando o esforço de controle, porém não obteve êxito causando uma saturação no esforço de controle como podemos observar na Figura 34, já que o sistema tem limite da tensão de controle que é de $\pm 10\text{V}$.

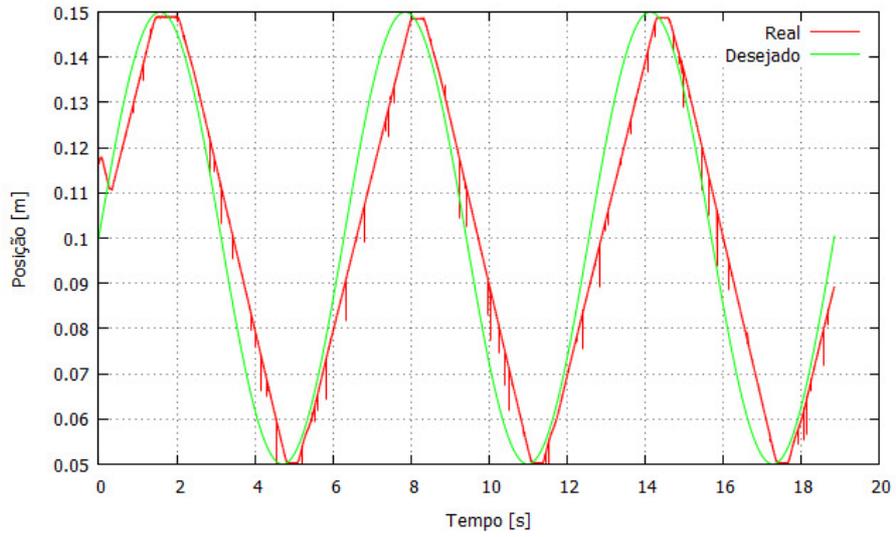


Figura 32. Trajetória com frequência 1.0rad/s.

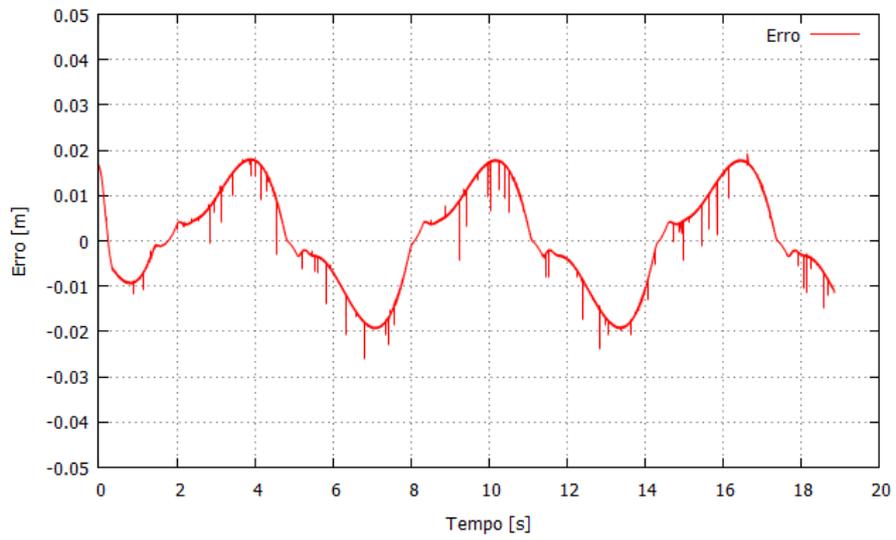


Figura 33. Erro para frequência de 1.0rad/s.

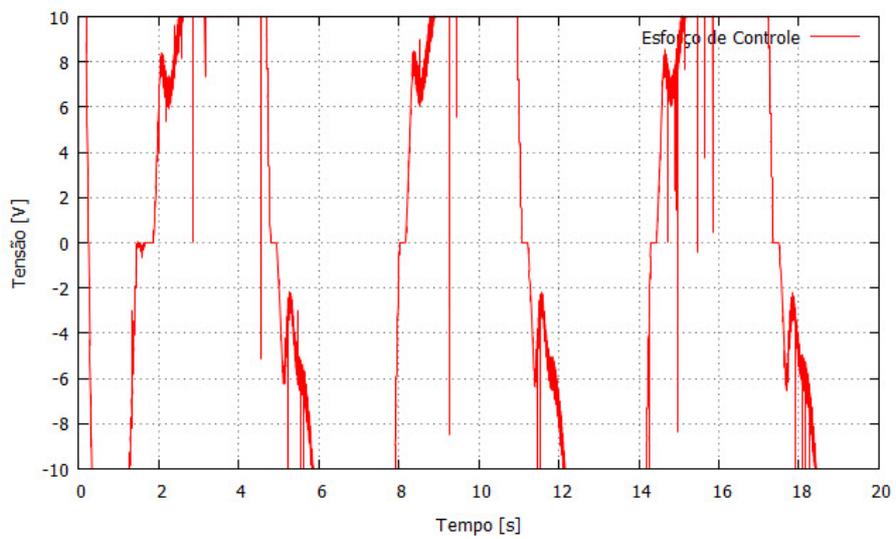


Figura 34. Esforço de Controle para frequência de 1.0rad/s.

Se ampliarmos a região em destaque na Figura 35 poderemos observar uma anomalia que ocorre próximos dos valores extremos como pode ser visto na ampliação na Figura 36, isto ocorre devido a presença da zona morta na válvula, fato também percebido por Lopes (2010) nos resultados de seus experimentos. Este fenômeno só é percebido quando o rastreamento aproximasse do sinal de referência.

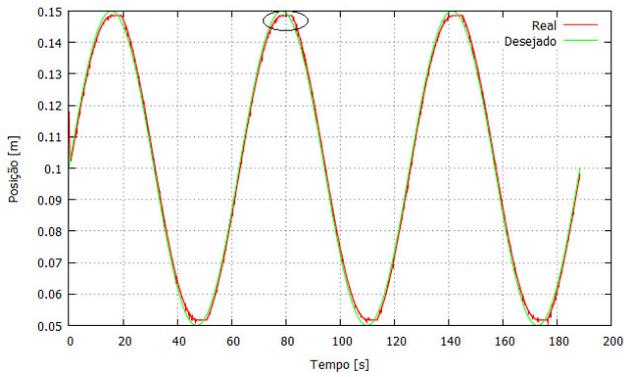


Figura 35. Anomalia.

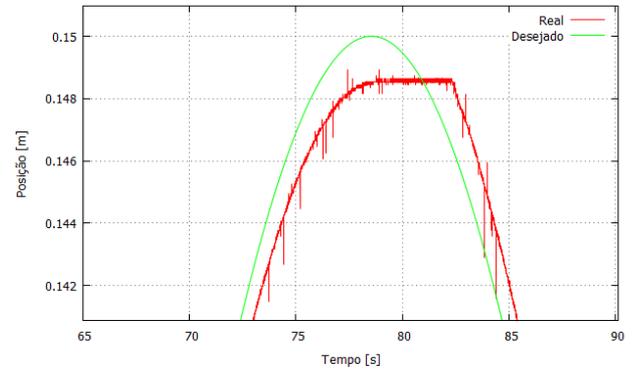


Figura 36. Ampliação.

9. CONCLUSÃO

Os controladores de fuzzy podem ser aplicados em diversas áreas da engenharia e apresentam algumas características interessantes como a não necessidade de conhecer o modelo matemático do sistema para controlá-lo e a relativa simplicidade de sua aplicação, por estes motivos atraem a atenção de pesquisadores na área de controle de sistemas.

Dentro deste contexto o presente trabalho tem com objetivos a avaliação experimental de um controlador fuzzy e a estruturação de uma bancada eletro-hidráulica para a avaliação deste controlador, objetivos os quais foram alcançados como foi descrito neste trabalho.

O controlador fuzzy mostrou-se eficaz no rastreamento da trajetória pré-determinada, porém devido as limitações físicas da bancada o sistema teve uma eficiência satisfatória para frequências baixas, pois quando é preciso um esforço de controle maior o sistema satura e não acompanha a velocidade da curva de referência, assim como foi apresentado no capítulo 8, quer quanto maior a frequência maior esforço de controle, porém até uma frequência no entorno de 0.5rad/s o erro é mantido em um patamar aceitável e o esforço de controle não satura.

Nos próximos trabalhos pretende-se utilizar outras técnicas de controle inteligente, ou a lógica fuzzy associado a outras técnicas de controle para tentar melhorar o desempenho para frequências maiores que 0.5rad/s e tentar evitar a saturação do sistema mantendo o erro em limites convenientes.

A bancada hidráulica foi estruturada para ser utilizada em diversas aplicações experimentais, pois pretende-se em um futuro trabalho adicionar outros elementos que dificultem o controle e façam com que o sistema real se aproxime do modelo matemático apresentado no capítulo 5, ou seja, construir um mecanismo em que uma mola e um amortecedor seja inserido no sistema. Um outro possível incremento seria um mecanismo pendular o que abre outro leque de possibilidades.

REFERENCIAS

- ADVANTECH, (2014). Disponível em <<http://www.advantech.com.br/>>. Acesso em 12 maio 2014.
- BELCHIOR, A. D. (1997). Um Modelo Fuzzy para Avaliação da Qualidade de Software, Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia de Sistemas e Computação), Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- BESSA, W. M. e BARRÊTO, R. S. S. (2010). Adaptive fuzzy sliding mode control of uncertain nonlinear systems. *Controle & Automação (Impresso)*, v. 21, p. 117-126.
- BESSA, W. M., DUTRA, M. S. e KREUZER, E. (2010a). An adaptive fuzzy sliding mode controller for remotely operated underwater vehicles. *Robotics and Autonomous Systems*, 58(1), p. 16-26.
- BESSA, W. M., DUTRA, M. S. e KREUZER, E. (2010b). Sliding Mode Control with Adaptive Fuzzy Dead-Zone Compensation of an Electro-hydraulic Servo-System. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, v. 58, p. 3-16.
- BESSA, W. M., DUTRA, M. S. e KREUZER, E. (2010c). An adaptive fuzzy dead-zone compensation scheme and its application to electro-hydraulic systems. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering (Impresso)*, v. 32, p. 1-7.
- BESSA, W.M., PAULA, A.S. e SAVI, M. A. (2009). Chaos control using an adaptive fuzzy sliding mode controller with application to a nonlinear pendulum. *Chaos, Solitons and Fractals*, v.42, p.784-791.
- FERNANDES, J.M.M. (2012). Controle Inteligente de Sistemas Eletrohidráulicos Utilizando Redes Neurais Artificiais, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- FESTO DIDACTIC. (2001). Hidráulica Industrial. Festo Didactic, São Paulo.
- FESTO, (2014). Disponível em <<http://www.festo-didactic.com/br-pt/>>. Acesso em: 12 maio 2014.
- FIALHO, A. B. (2003). Automação hidráulica: projetos, dimensionamento e análise de circuitos. 2 ed. Érica, São Paulo.
- GOMIDE, F.A.C. e GUDWIN, R.R. (1994). Modelagem, Controle, Sistema e Lógica Fuzzy. *Controle & Automação*. v. 4. p. 97-115.
- JAFELICE, R.S.M. (2012). Teoria dos Conjuntos Fuzzy com Aplicações. *SBMAC*, v. 17, 119 p
- KLUG, M. e CASTELAN, E. B. (2011). Compensadores dinâmicos para sistemas discretos no tempo com parâmetros variantes e aplicação um sistema fuzzy takagi-sugeno. *Controle & Automação*, v. 23, p. 517-529.

- LOPES, A.D. (2010). Avaliação Experimental de Controlo de Força em Servossistema Hidráulico, Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade do Porto.
- MACINTYRE, A. J. (2010) Instalações hidráulicas: prediais e industriais. 4 ed. LTC, Rio de Janeiro.
- MERRITT, H.E. (1967), Hydraulic Control Systems, John Wiley & Sons, New York.
- RIGNEL, D.G.S; CHECI, G.P. e LUCAS, C.A. (2011). Um Introdução a Lógica Fuzzy. Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica, v. 01, p. 17-28.
- SANTOS, S.L. (2007). Bombas & instalações hidráulicas. LCTE, São Paulo.
- SILVA, F.V., FILETI, A.M.F. e LEITE, M.S. (2010). Desenvolvimento e Aplicação Experimental de Controladores Fuzzy e Convencional em um Bioprocesso. Revista Controle & Automação, Vol. 21, No 2, p. 147-158.
- SILVA, I.M.G. (2004). Controlo Robusto de Ordem não Inteira de um Eixo Linear Electro-Hidráulico com Forte Atrito, Dissertação (Mestrado em Automação, Instrumentação e Controle), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- TANAKA, M.C. (2011). Utilização da lógica difusa no controle inteligente de Sistemas eletrohidráulicos, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

ANEXOS

CÓDIGO FONTE

```
//-----//

#include <vc1.h>
#pragma hdrstop

#include <time.h>
#include <iostream>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <conio.h>
#include "compatibility.h"
#include "bdaqctrl.h"
#define N 5

#include <tchar.h>

using namespace Automation::BDaq;

//----- Definindo o Dispositivo utilizado -----//

#define deviceDescription L"USB-4711A,BID#0"

//----- Funções -----//

// Função para obter o maximo valor entre 2 valores
float MAX ( float n1, float n2)
{
    float max = n1;
    if(n2 > max)
        max = n2;
    return max;
}

// Função para obter o menor valor entre 3 valores
float MIN (float n1, float n2, float n3)
{
    float min = n1;
    if(n2 < min)
        min = n2;
        if(n3 < min)
            min = n3;
    return min;
}

//-----//

#pragma argsused
int _tmain(int argc, _TCHAR* argv[])
{
/*----- Inicializando a placa de aquisição -----*/

    DeviceInformation devInfo(deviceDescription);

    /*Inicializando as funções de escrita de leitura das portas analógicas*/

    InstantAoCtrl * instantAoCtrl = AdxInstantAoCtrlCreate();
    InstantAiCtrl * instantAiCtrl = AdxInstantAiCtrlCreate();
```

```

instantAoCtrl->setSelectedDevice(devInfo);
instantAiCtrl->setSelectedDevice(devInfo);

/*----- Configuração para uso do Dispositivo Advantech -----*/

AoChannelCollection *channelsAo = instantAoCtrl->getChannels();
channelsAo->getItem(0).setValueRange(V_Neg10To10);
channelsAo->getItem(1).setValueRange(V_Neg10To10);
AiChannelCollection *channelsAi = instantAiCtrl->getChannels();
channelsAi->getItem(0).setValueRange(V_Neg10To10);

/*-----*/

int32 ch = 0; //
double dataInput = 0.0; //
double dataScaled = 0.0; //
double SetPoint = 0.0; //
double time = 0.0; //
double time0 = 0.0; //
double u = 0.0; //
double x = 0.0, V_out = 0.0; //
double x_ref = 0.0; //
const double A_hat = 0.05; //Amplitude do seno em metros
const double omega = 0.9; //Frequência do seno em radiando por segundos
const double x_refm = 0.1; //Center do seno em metros

FILE *Dados;
Dados = fopen("Dados.txt", "w");

/*-----*/

double a0 = -0.050001, b0 = -0.05, c0 = -0.005, d0 = -0.001;
double a1 = -0.005, b1 = -0.001, c1 = +0.0;
double a2 = -0.001, b2 = +0.0, c2 = +0.001;
double a3 = +0.0, b3 = +0.001, c3 = +0.005;
double a4 = +0.001, b4 = +0.005, c4 = +0.05, d4 = +0.050001;

double U[N], C[N] = {-10.0, -2.0, 0.0, +2.0, 10.0}, Delta[N];

double delta_u = 0.0, erro = 0.0;
int i, j;

/*-----*/

printf("\nDigiti o SetPoint: ");
scanf("%lf",&SetPoint);

instantAiCtrl->Read(ch,dataInput);

if(dataInput<SetPoint){
    dataScaled = -10;
    instantAoCtrl->Write(ch,dataScaled);
    do{
        instantAiCtrl->Read(ch,dataInput);
        printf("%lf\n",dataInput);
    }while(dataInput<SetPoint);
    dataScaled = 0;
    instantAoCtrl->Write(ch,dataScaled);
}else{
    dataScaled = 10;
    instantAoCtrl->Write(ch,dataScaled);
    do{

```

```

        instantAiCtrl->Read(ch,dataInput);
        printf("%lf\n",dataInput);
    } while(dataInput>SetPoint);
    dataScaled = 0;
    instantAoCtrl->Write(ch,dataScaled);
}

//-----//
//----- Controlador-----//
//-----//

time0 = clock()/CLOCKS_PER_SEC;

do{

    time = (clock()/CLOCKS_PER_SEC) - time0;

    x_ref = A_hat * sin(omega * time) + x_refm;
    instantAiCtrl->Read(ch,dataInput);
    x = (20.361*dataInput + 14.7197)/1000;

    erro = (x - x_ref);
    u = erro;

    U[0] = MAX(MIN((u-a0)/(b0-a0),1,(d0-u)/(d0-c0)),0);
    U[1] = MAX(MIN((u-a1)/(b1-a1),(c1-u)/(c1-b1),2),0);
    U[2] = MAX(MIN((u-a2)/(b2-a2),(c2-u)/(c2-b2),2),0);
    U[3] = MAX(MIN((u-a3)/(b3-a3),(c3-u)/(c3-b3),2),0);
    U[4] = MAX(MIN((u-a4)/(b4-a4),1,(d4-u)/(d4-c4)),0);

    for(j=0;j<N;j++){
        Delta[j] = C[j]*U[j];
        delta_u = delta_u + Delta[j];
    }

    dataScaled = delta_u;

    instantAoCtrl->Write(ch,dataScaled);
    printf("%lf\t%lf\t%lf\t%lf\t%lf\n",time,x_ref,x,erro,delta_u);
    fprintf(Da-
dos,"%lf\t%lf\t%lf\t%lf\t%lf\t%lf\t%lf\t%lf\t%lf\t%lf\n",time,x_ref,x,erro,delta_u,U[0],U[1],U[2],U[3],U[4]);
    delta_u = 0;

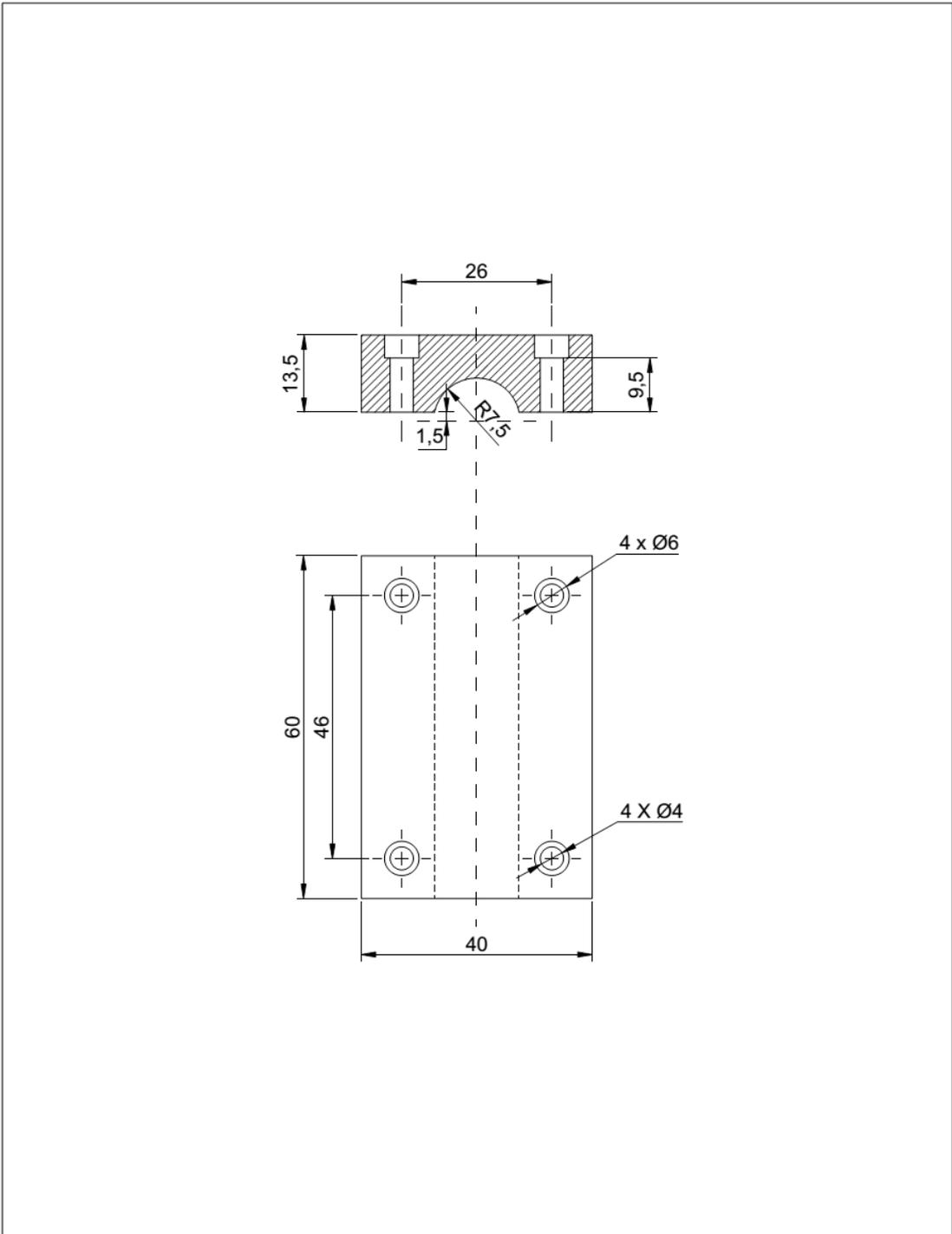
} while (time*omega < 3*2*M_PI);

u = 0;
instantAoCtrl->Write(ch,u);

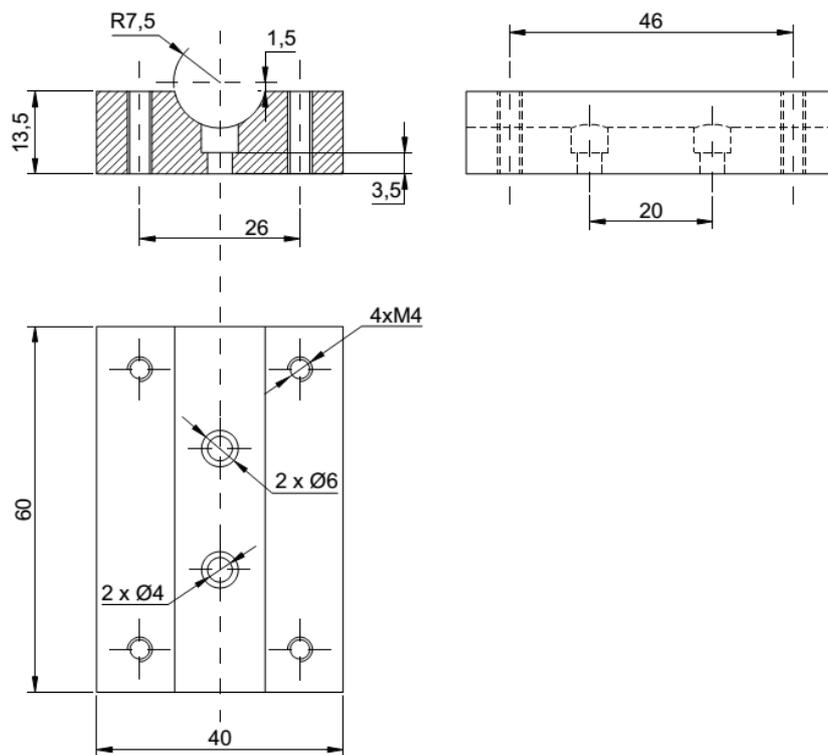
fclose(Dados);
system("pause");
return 0;
}
//-----//

```

DESENHOS DO SUPORTE



<h1 style="font-size: 2em; margin: 0;">UFRN</h1>	Centro de Tecnologia	
	Departamento de Engenharia Mecânica	
	Curso de Engenharia Mecânica	
<small>Título:</small> Suporte (Parte Superior)	<small>Título:</small> Jorge L. M. lima	<small>Projeção:</small>
<small>Escala:</small> 1:1	<small>Prancha:</small> 01	<small>Unidade:</small> mm
<small>Controle:</small>	<small>Data:</small> 12-06-2011	<small>Visto:</small>



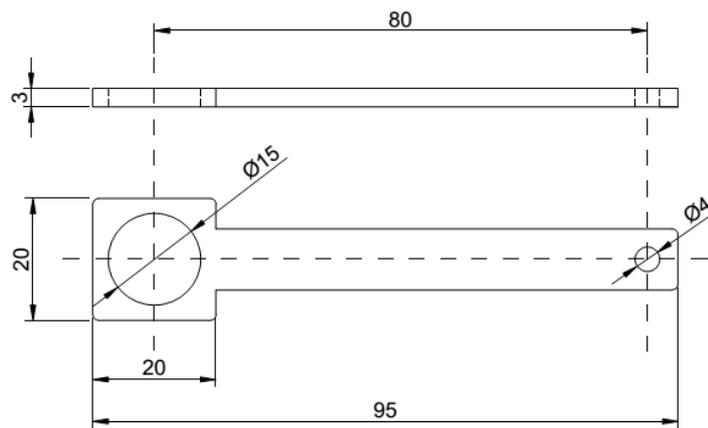
UFRN

Centro de Tecnologia

Departamento de Engenharia Mecânica

Curso de Engenharia Mecânica

Título: Suporte (Parte Inferior)		Título: Jorge L. M. lima		Projeção: 	
Escala: 1:1	Prancha: 02	Unidade: mm	Controle:	Data: 12-06-2011	Visto:

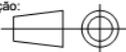


UFRN

Centro de Tecnologia

Departamento de Engenharia Mecânica

Curso de Engenharia Mecânica

Título: Guia		Título: Jorge L. M. lima		Projeção: 	
Escala: 1:1	Prancha: 03	Unidade: mm	Controle:	Data: 12-06-2011	Visto: