

# APLICAÇÃO DE LÓGICA DIFUSA NO CONTROLE DE PRESSÃO DE UMA CÂMARA DE TESTE

Guilherme Evandro de Oliveira, Engenharia de Automação e Controle, guilherme.evandro@gmail.com

**Resumo** – O controle de variáveis através de dispositivos e mecanismos lógicos é amplamente aplicado no mundo atual. Existem diversos métodos de implementar esse controle e um deles é através de Lógica Difusa (Fuzzy). Neste trabalho, a Lógica Fuzzy foi aplicada para estudar o desempenho da mesma e um controlador PID, de forma a sintonizar seus ganhos em tempo real, de acordo com o erro no momento, tornando o sistema de controle adaptável. Como forma de comparar o desempenho, um controlador PID convencional (pré-sintonizado) foi aplicado no mesmo sistema. Os resultados mostraram que o controle Fuzzy-PID possuem desempenho superior ao PID convencional, a razão é que aquele responde de maneira mais satisfatória a condições adversas com baixo erro (como pequenas oscilações).

**Palavras-chave** – Lógica Difusa, transdutores, pressão, sistema de controle, controlador PID, controle adaptativo

**Abstract** – The control of variables through devices and mechanisms is currently implemented over the world. There are several methods of implementing this control and one of them is the Fuzzy Logic. In this article, Fuzzy Logic was applied to study its performance in PID controller, tuning its gains in real time, according to the error at the moment, making the control system adaptable. As a way of comparing performance, a conventional (pre-tuned) PID controller was applied to the same system. The results show that the system operating with Fuzzy-PID control has superior performance than conventional PID. The reason is that it responds more satisfactorily to adverse conditions with low error (such as small oscillations).

**Keywords** – Fuzzy Logic, transducers, pressure, control system, PID controller, adaptive control

## I. INTRODUÇÃO

Na Engenharia de Controle, o estudo dos sistemas de controle e suas aplicabilidades é uma das áreas mais importantes. Analisar o funcionamento de um dispositivo ou processo, compreender qual o seu objetivo e quais variáveis devem ser controladas para que o mesmo seja alcançado e, então, propor um mecanismo que promova o controle mais eficiente dessas variáveis são tarefas que demandam informações e conhecimentos prévios das técnicas existentes.

Em simples definição, sistema de controle é um nome genérico dado a um conjunto de mecanismos, dispositivos ou algoritmos, que trabalhando juntos ou independentes, tem a finalidade de automaticamente, manter uma grandeza física (temperatura, pressão, tensão, corrente etc) sob controle, ou

seja, em um nível pré determinado.

Parte essencial de um sistema de controle é o monitoramento da grandeza (ou variável) a ser controlada, tal função é geralmente efetuada com o auxílio de dispositivos transdutores, também conhecidos como sensores. Esses dispositivos possuem características particulares que influenciam diretamente na dinâmica do sistema, como a resposta do sensor a determinado estímulo.

Os sinais enviados por esses sensores são utilizados como entradas de um algoritmo lógico-matemático, o núcleo da técnica de controle, que tem como saída o sinal de controle, que será responsável por reduzir o erro do sistema e aproximar o comportamento do mesmo ao desejado.

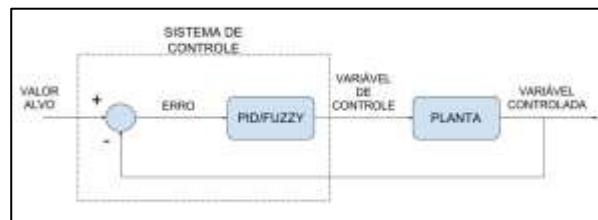
Os mecanismos de controle são algoritmos lógico-matemáticos com parâmetros definidos previamente em projeto e que recebem entradas, como Valor Alvo (ou *setpoint*), que é o valor desejado de trabalho de determinada variável do sistema, e o Erro, que é diferença entre o valor-alvo e o comportamento real da variável a ser controlada.

A Figura 1 mostra a representação de sistema de controle típico.

O objetivo deste trabalho é estudar o funcionamento de um desses mecanismos, a Lógica Difusa (Fuzzy), em um controle de pressão de ar.

Composto por uma câmara (com propriedades complacentes), uma bomba de ar, sensor de pressão (aferindo a pressão interna da câmara) e três válvulas de controle simples (não proporcionais, com fluxos diferentes), o objetivo é proporcionar o estudo de controle de sistema que opera baseado em uma grandeza mecânica, que depende da força e da área e como as características inerentes aos componentes influenciam no sistema de controle, por exemplo: as válvulas não são proporcionais como LEDs, possuem apenas dois estados, aberto e fechado, e a pressão de ar fornecida pela bomba pode levar um certo tempo para chegar a um Valor Alvo, se comparado a um controle de iluminação, onde os dispositivos luminosos podem acender rapidamente.

Figura 1 – Representação básica de um sistema de controle



Fonte: Acervo do autor

### A. Sistema de Controle

Segundo Nise (2008), sistemas de controle são definidos como *subsistemas* e *processos* construídos com o objetivo de se obter uma *saída* desejada com desempenho desejado, para uma *entrada* específica fornecida.

Os sistemas de controle são, tradicionalmente, classificados em duas configurações: Sistemas em Malha Aberta e Sistemas em Malha Fechada.

Sistemas em Malha Aberta são sistemas de controle onde um dispositivo é ajustado para se obter um valor desejado em uma variável de saída, como determinar a abertura de uma válvula que irá promover um valor de vazão específico.

Sistemas em Malha Fechada são sistemas de controle onde a amostra da saída realimenta o próprio sistema, indicando se o que está sendo entregue corresponde ao desejado. Caso exista erro (diferença entre a saída e o valor desejado), automaticamente o sistema altera certos parâmetros com a finalidade de reduzir ou eliminar esse erro.

### B. Dispositivos Transdutores

Transdutores são dispositivos que, amparados por sensores, funcionam como conversores de estímulos físicos. Esses componentes recebem um sinal de determinada grandeza do meio de trabalho e transforma para uma que o sistema de controle consegue interpretar. Por exemplo, transdutores de temperatura que convertem o calor em sinais elétricos para serem processados pelo sistema.

Esses dispositivos possuem parâmetros que devem ser considerados para que a sua operação no sistema seja satisfatória, como por exemplo, a Linearidade, que é o nível de proporcionalidade entre a grandeza aferida e o sinal gerado, correspondendo à precisão do transdutor e a Faixa de Atuação, que corresponde ao intervalo de valores da grandeza que o transdutor pode operar sem ocorrer danos ou imprecisão.

### C. Controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo)

Controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) é uma algoritmo de controle baseado na atuação de três coeficientes, que são ajustados com a finalidade de se alcançar a resposta desejada. Os coeficientes do controlador PID são o Ganho Proporcional ( $k_p$ ), que, de forma simples, corresponde ao fator de resposta do sistema para compensar ao erro, Ganho Integral ( $k_i$ ), que promove uma ação proporcional o erro acumulado em um intervalo de tempo e Ganho Derivativo ( $k_d$ ), que corresponde a reação do sistema de controle à taxa de variação do erro.

Uma das vantagens dos controles PID, segundo Ogata (2010), está na sua aplicabilidade geral à maioria dos sistemas de controle. Em particular, quando o modelo matemático da planta não é conhecido e, portanto, métodos de projeto analítico não podem ser utilizados, controles PID se mostram os mais úteis.

### D. Lógica Difusa (Fuzzy)

Lógica Difusa (ou Fuzzy) é um sistema que tem em seu princípio ir além da lógica booleana convencional, caracterizada por utilizar os valores absolutos “1” ou “0”, “verdadeiro” ou “falso”. A lógica difusa trabalha com valores entre o “1” e o “0”, sendo mais semelhante com o julgamento de valores humano. A lógica pode se valer de definições como “parcialmente verdadeiro” ou “não muito falso”.

De forma breve, a lógica difusa possibilita que suas entradas e saídas sejam, cada uma delas, subdivididas em zonas de pertinência, que são definidas previamente com bases nos estudos e nos objetivos ao utilizar esse sistema lógico. Assim, a saída (ou saídas) será um valor baseado em funções matemáticas conduzidas por proposições lógicas determinadas por, onde a entrada (ou entradas) serão conectadas por SE, OU ou E e a saída definida através do conectivo ENTÃO. Essas funções formarão o Sistema de Regras da Lógica Difusa.

Uma vantagem da implementação de Lógica Difusa nos sistemas é que o trabalho com regras, onde reside a estrutura lógica do sistema, é baseado no raciocínio linguístico humano (Lah et al, 2004)

## III. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do projeto relativo a este trabalho teve de obedecer certas etapas. Por se tratar de um estudo baseado em uma planta física, foi necessário o dispêndio de energia e tempo em atividades práticas. Sendo assim, para melhor compreensão da metodologia deste estudo, o mesmo pode ser compreendido nas seguintes etapas: Projeto, montagem, parametrização e testes experimentais.

### A. Projeto

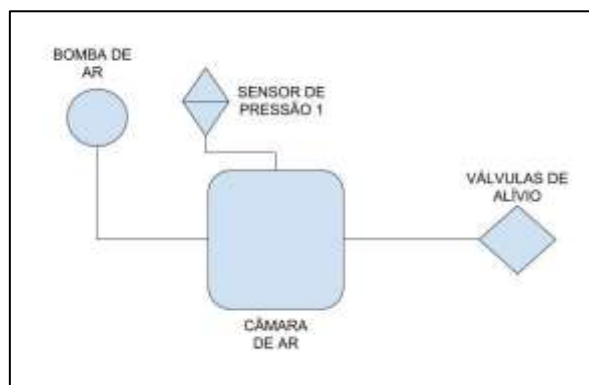
O projeto consiste em uma câmara de ar que tem sua pressão interna controlada por dispositivos interconectados operando sob um sistema de controle por Lógica Difusa e Controlador PID.

A planta funcionará de modo a promover e manter no interior da câmara de ar, uma pressão determinada pelo usuário (valor alvo, ou *setpoint*).

A câmara irá armazenar o ar pressurizado pela bomba de pressão. Esse ar (que exerce pressão nas superfícies internas da câmara) terá como saída três válvulas, responsáveis pelo alívio da pressão (quando o valor alvo está abaixo da pressão aferida no momento). A bomba fornece a possibilidade de controle sobre seu fluxo de saída alterando o nível de tensão de alimentação, já as válvulas, conforme mencionado anteriormente, não possuem a capacidade de alteração desse parâmetro para exercer o alívio, sendo que seu funcionamento é simples, estático, ou está aberta, ou está fechada.

O sensor de pressão será utilizado para aferir a pressão no interior da câmara (Sensor de Pressão 1), fundamental para o controle, que é o propósito do projeto.

Figura 2 – Diagrama Geral



Fonte: Acervo do autor

A Figura 2 corresponde a um diagrama geral dos componentes do projeto.

### A.1. Descrição dos componentes

#### A.1.a. Bomba de Ar

A bomba de ar escolhida para ser utilizada é a P54C06R, do fabricante *Oken Seiko*. Sua escolha se deve ao fato de que este modelo estava mais acessível e que ele atende os requisitos do projeto. É um dispositivo compacto e seu mecanismo de operação funciona a partir de múltiplos cilindros atuados por um motor de corrente contínua. É alimentado com tensão contínua, de 0 a 12 Vcc e fornece uma pressão positiva de até 500 mmHg. O fluxo de saída é proporcional à tensão aplicada na alimentação.

#### A.1.b. Válvulas de Ar

As válvulas de ar utilizadas possuem mecanismo de funcionamento através de solenóide, são configuradas como “Normal Fechado” e são alimentadas com tensões de 12 Vcc. São simples e serão posicionadas de modo que a atuação de cada válvula promova um alívio com fluxos diferentes (fluxo pequeno, fluxo médio e fluxo alto).

Os componentes utilizados no projeto correspondem aos modelos LFDX05005200AE, fabricado pela *The Lee Company*, e KSV05A, fabricado pela *Koge*.

#### A.1.c. Sensor de Pressão

O sensor de pressão possui como mecanismo transdutores piezoresistivos, que são componentes que alteram a resistência elétrica em função da força exercida sobre seu corpo.

É alimentado com 5 Vcc e possui uma saída que tem resposta diretamente proporcional à pressão aferida (que pode ir de 0 a aproximadamente 370 mmHg). A resposta desse

componente e a equação para obtenção da pressão (em kPa) pode ser visualizada na figura 5 deste documento.

No projeto, a pressão de trabalho (controle) vai de 30 e 150 mmHg.

O componente utilizado é o MPX5050GP, do fabricante *Freescale Semiconductor*.

#### A.1.d. Microcontrolador

O microcontrolador utilizado para armazenar o programa, colher e interpretar as medições e enviar os sinais para controlar a planta é o ATmega328P, que possui número suficiente de entradas e saídas e uma boa resolução (10 bits). Seu funcionamento será baseado em um módulo de plataforma de protótipo Arduino (Modelo UNO). Sua comunicação com o computador se dará através de porta USB.

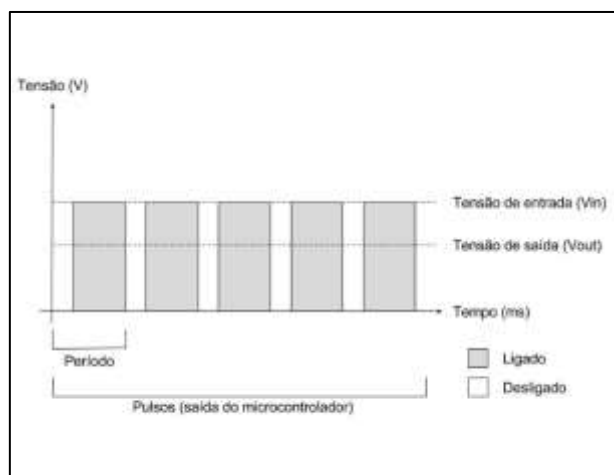
#### A.1.e. Módulos de Potência

A função dos módulos de potência é permitir a alimentação dos componentes que demandam níveis de corrente e tensão acima do que as saídas do microcontrolador podem fornecer.

Os módulos utilizados serão dispositivos baseados em chaveamento de transistor, onde será possível controlar uma tensão de saída a partir de uma entrada com chaveamento simples ou PWM, possibilitando controlar o acionamento das válvulas e a intensidade do fluxo de ar que a bomba irá enviar à câmara.

A Figura 3 ilustra como o módulo possibilita o controle de uma tensão através da frequência dos pulsos enviados pelo microcontrolador. No período, quanto maior o tempo ligado (transistor em saturação), maior a proporção da tensão de saída em relação à tensão de entrada.

Figura 3 – Gráfico de Resposta do Módulo de Potência



Fonte: Acervo do autor

### A.1.f. Câmara de Ar

A câmara de ar será um recipiente de borracha e deverá possuir certa complacência, que é a capacidade do material se distender de forma elástica, permitindo um manejo capaz de provocar aumento de pressão em seu interior.

Nesse projeto, como câmara, será utilizado um manguito pediátrico, fabricado pela *Dixtal*.

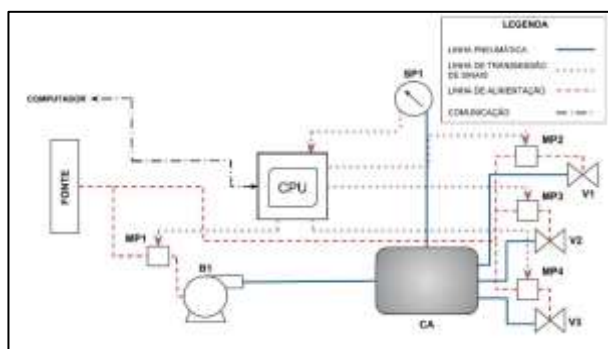
### A.1.g. Fonte de Alimentação

Para alimentar os componentes do sistema, será utilizado uma fonte chaveada com entrada de tensão de 127-220 Vca e saídas de 3,3, 5 e 12 Vcc, com limitação de corrente de 15 Amperes. A fonte já vem montada e é o mesmo modelo utilizada em computadores.

## B. Montagem

O sistema será montado conforme diagrama a seguir.

Figura 4 – Diagrama unifilar



Fonte: Acervo do autor

Tabela 1 – Relação de componentes do diagrama

COMPONENTES	
SIGLA	DESCRIÇÃO
CPU	Microcontrolador
CA	Câmara de Ar
FONTE	Fonte de Alimentação
SP1	Sensor de Pressão 1
B1	Bomba de Ar
MP1	Módulo de Potência 1
MP2	Módulo de Potência 2
MP3	Módulo de Potência 3
MP4	Módulo de Potência 4
V1	Válvula 1 (fluxo baixo)
V2	Válvula 2 (fluxo médio)
V3	Válvula 3 (fluxo alto)

Fonte: Acervo do autor

A representação da Figura 4 mostra de forma objetiva como os componentes do projeto serão interligados e qual o tipo de interligação. Conexões pneumáticas são relacionadas à

pressão de ar e serão realizados por tubos de silicone ou material similar. A conexão entre o microcontrolador (CPU) e o computador que servirá de supervisor do sistema será realizada através de cabo USB. As demais conexões, por se tratarem de sinais elétricos, serão realizadas por cabos e fios comuns.

## C. Parametrização

Uma das etapas na realização do projeto é parametrizar seus componentes e a forma como eles se relacionam no funcionamento da planta, definindo como cada um vai funcionar e seus limites (se houverem).

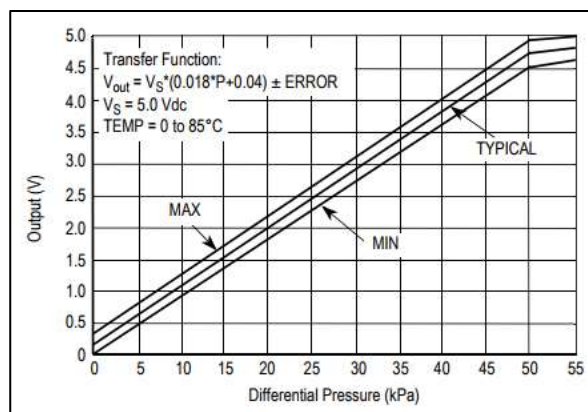
A pressão na câmara será limitada a 150 mmHg, pois é um valor razoável de acordo com as limitações da mesma, além de estar abaixo do limite máximo de pressão que alguns componentes do sistema suportam. A pressão mínima não foi definida, mas será limitada ao nível residual no interior da câmara quando esta estiver vazia. Contudo, como a proposta é controlar o nível de pressão, o software vai limitar a pressão de controle mínima a 30 mmHg, ou seja, o Valor Alvo mínimo é limitado a e esse nível. As justificativas para esse limite é que abaixo disso, a resposta do transdutor de pressão é muito baixa, ficando mais suscetível a ruídos e a pressão residual fica em torno de 10 mmHg.

A Figura 5 mostra a curva de resposta do sensor em relação a pressão aplicada. Nela é possível ver que 50 mmHg (aproximadamente 6,7 kPa) equivale a uma saída em torno de 0,645 V. O limite máximo de trabalho da planta, 160 mmHg, corresponde a uma saída de aproximados 2,3V.

Como foi exposto, o regime de trabalho do sistema é limitado a 160 mmHg e o previsto é que o controle seja mais efetivo quando o Valor Alvo for maior que 30 mmHg. Os testes, para fins de análise de resposta, serão realizados utilizando valores definidos, fixados em 50, 100 e 150 mmHg.

É importante destacar que toda a menção de pressão utilizada nesse sistema é em função da aferição do sensor e do sinal que o mesmo fornece, ou seja, o valor da variável não é validado por algum instrumento calibrado, embora exista um manômetro para comparação

Figura 5 – Resposta do Sensor de Pressão



Fonte: Freesscale Semiconductor



### C.1. Lógica fundamental de funcionamento da planta

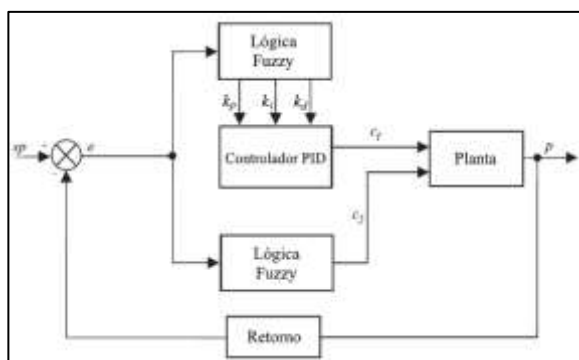
A lógica de funcionamento da planta é direcionada para o controle da pressão interna da sua câmara. Essa pressão é definida por um operador e pode ser ajustada em um valor entre 30 mmHg e 150 mmHg. Esse valor será chamado de Valor Alvo. A partir desse valor a planta irá operar para que essa pressão seja estabelecida no interior da câmara. Caso a pressão, que é aferida por um sensor, esteja abaixo do Valor Alvo, a bomba será acionada para pressurizar o sistema, e caso a pressão esteja acima, as válvulas serão abertas para aliviar.

### C.2. Estrutura do mecanismo de controle

Conforme foi explanado anteriormente, os controles utilizados serão baseados em Lógica Difusa e Lógica Difusa adaptado a controle PID. A Figura 6 ilustra o esquema da estrutura de controle.

Como é possível ver no esquema de controle representado, a diferença entre o Valor Alvo  $sp$  e a pressão da câmara  $p$ , resulta no erro  $e$ , que é enviado a dois mecanismos de controle, um contendo Lógica Fuzzy (difusa) e PID e outro contendo apenas Lógica Fuzzy. O primeiro é responsável por controlar a potência da bomba (através do sinal  $c1$ ) e o segundo a abertura das válvulas ( $c2$ ).

Figura 6 - Esquema da estrutura de controle



Fonte: Acervo do autor

#### C.2.a. Mecanismo de Controle da Bomba de Ar

O controle da bomba de ar é realizado através da interação entre Lógica Difusa e Controle PID, conhecida como Controle Adaptativo PID/Fuzzy. Os controladores PID são simples e relativamente fáceis de implementar, contudo, o ajuste dos seus parâmetros é feito de forma fixa, para uma condição específica de trabalho e resposta. A inclusão da Lógica Difusa é permitir que os parâmetros do controlador PID sejam alterados de acordo com as condições de funcionamento da planta, permitindo que o controle se adapte para obter uma melhor precisão e resposta.

Nesse caso, o fuzzy ajusta os parâmetros do PID  $kp$ ,  $ki$  e  $kd$  de acordo com o erro  $e$ .

A estrutura da lógica difusa nesse caso é baseada na

inferência de uma entrada (erro), que resulta em três saídas (ganhos do PID).

Para entrada das variáveis no fuzzy, a entrada erro  $e$  permite valores que variam de -120 a 120, sendo recebido diretamente da diferença entre o Valor Alvo e a pressão da câmara. As saídas  $kp$ ,  $ki$  e  $kd$  variam de 0 a 1, porém, antes de serem enviadas aos PID passam por operações matemáticas para adequar-se proporcionalmente a uma faixa de valores de operação do controle. Por exemplo, a saída do fuzzy  $kp$ , corresponde a uma faixa de 0 a 20, já as saídas  $ki$  e  $kd$ , são na faixa de 0 a 0,01 e de 0 a 0,002 respectivamente.

A entrada erro  $e$  foi semanticamente dividida em seis funções, sendo elas Negativo (N), Baixo-Positivo (BP), Médio-Positivo (MP), Positivo (P), Alto-Positivo (AP) e Máximo (MAX).

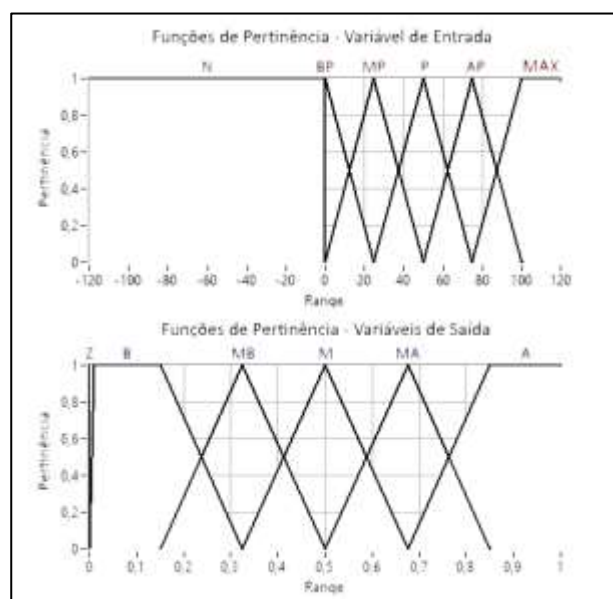
As saídas também foram divididas em seis funções, Zero (Z), Baixo (B), Médio-Baixo (MB), Médio (M), Médio-Alto (MA) e Alto (A).

A Figura 7 mostra as funções de pertinência dessa lógica.

Para completar, é necessário que se estabeleça regras entre as funções. A Tabela 2 mostra as regras de inferência utilizadas na lógica.

O método utilizado para implementar a defuzzificação é o Centro de Área (também conhecido como Centroid), onde o valor de saída (de  $kp$ ,  $ki$  e  $kd$ ) é o correspondente a média ponderada da área resultante da relação da entrada ( $e$ ), com as funções e a inferência das regras.

Figura 7 - Funções de Pertinência – Controle da Bomba



Fonte: Acervo do autor

Esses valores de saída são enviados ao controlador PID, que através do sinal  $c1$  (que varia de 0 a 1) controla a potência da bomba por acionamento por largura de pulso (PWM).

Tabela 2 - Tabela de Regras – Controle da Bomba

e	kp	ki	kd
N	Z	Z	Z
BP	B	Z	Z
MP	MB	B	Z
P	M	BM	B
AP	MA	M	MB
MAX	A	MA	MB

Fonte: Acervo do autor

### C.2.b. Mecanismo de Controle das Válvulas

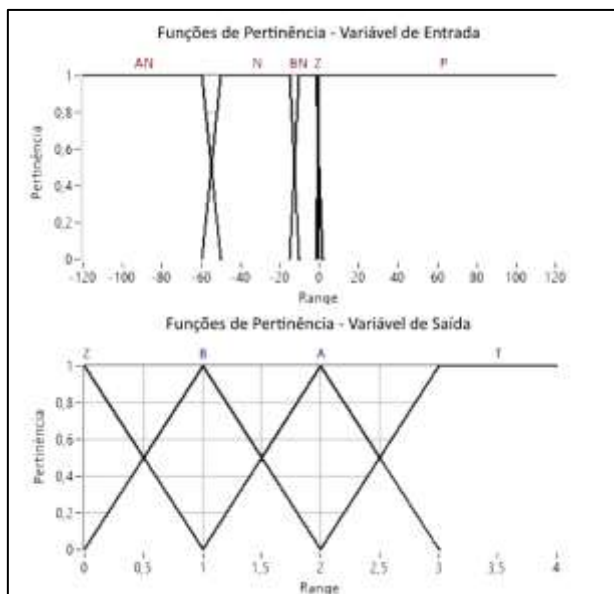
O controle das válvulas é realizado por um algoritmo que responde de acordo com uma análise feita por Lógica Difusa. Com base no erro  $e$ , que varia de -120 a 120, o fuzzy determina um valor  $c2$  (entre 0 e 4) que corresponde à abertura das válvulas, como estas não possuem abertura proporcional, esse valor de saída é enviado a um algoritmo que abre as válvulas em uma configuração correspondente à essa resposta.

A Figura 8 mostra as funções de pertinência da lógica de alívio da pressão.

A entrada foi dividida em cinco funções, sendo elas Alto-Negativo (AN), Negativo (N), Baixo-Negativo (BN), Zero (Z) e Positivo (P).

Já as saídas foram divididas em quatro funções, Zero (Z), Baixo (B), Alto (A) e Total (T).

Figura 8 - Funções de Pertinência – Controle das Válvulas



Fonte: Acervo do autor

Na entrada, a função Zero, triangular, permite que seja feito um ajuste da tolerância ao erro, como mostrado na Tabela 3.

Assim como no controle da bomba, o método utilizado na defuzzificação foi o Centro de Área.

Para que o sistema realize a abertura das válvulas, o valor  $c2$ , proveniente da Lógica Difusa, entra em um conjunto de regras, mostradas na tabela 4.

Tabela 3 - Tabela de Regras – Controle das Válvulas

e	c2
AN	T
N	A
BN	B
Z	Z
P	Z

Fonte: Acervo do autor

Tabela 4 - Tabela de Regras – Abertura das Válvulas (a partir de  $c2$ )

c2	V1	V2	V3
	BAIXO FLUXO	FLUXO MÉDIO	FLUXO ALTO
ENTRE 0 E 1	FECHADA	FECHADA	FECHADA
ENTRE 1 E 2	ABERTA	FECHADA	FECHADA
ENTRE 2 E 3	ABERTA	ABERTA	FECHADA
ACIMA DE 3	ABERTA	ABERTA	ABERTA

Fonte: Acervo do autor

Figura 9 – Fotografia do protótipo montado



Fonte: Acervo do autor

### D. Testes Experimentais

Todo o sistema descrito neste trabalho foi construído, na forma de protótipo (que pode ser visto na Figura 9), para que as ideias pudessem ser testadas e analisadas.

Para que o funcionamento pudesse ser implementado e as informações do sistema (leitura do sensor, frequência de acionamento das válvulas e bomba etc) analisadas, foi utilizado o ambiente de desenvolvimento LabVIEW para

conceber uma aplicação que executasse tais tarefas.

Com o objetivo de obter dados com a finalidade de realizar comparações e outras análises, foi necessário que se estabelecesse um método de avaliação, que constitui em uma série de testes com níveis de Valor Alvo e tempo de análise pré-determinados, e avaliação dos resultados obtidos nesses testes.

Para fins de comparação, foi desenvolvido um sistema com controlador PID sem a Lógica Difusa ajustando seus ganhos. Tais ganhos foram ajustados seguindo o Método de Ziegler e Nichols, baseado no ganho crítico ( $k_{cr}$ ) e no período crítico ( $p_{cr}$ ).

Tabela 5 – Regras de sintonia de Ziegler e Nichols baseada em ganho crítico ( $k_{cr}$ ) e período crítico ( $p_{cr}$ )

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

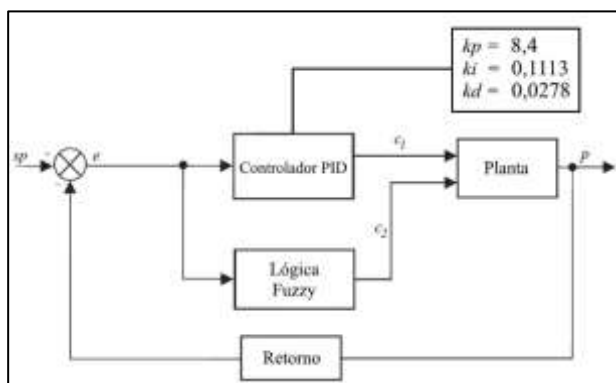
Fonte: Ogata, 2010

Os valores de  $k_{cr}$  e  $p_{cr}$  foram obtidos analisando a resposta do sistema, sob o Valor Alvo de 100 mmHg (um valor médio entre 50 e 150 mmHg), com um valor de ganho que levasse o sistema a responder de forma oscilatória contínua, sustentada. Esse valor de ganho é o  $k_{cr}$ . O período dessa oscilação é o  $p_{cr}$ . Os valores encontrados foram 14 e 222 ms.

Para obter os valores dos ganhos do controlador PID, foram utilizadas as regras expostas na Tabela 5.

Com as adaptações na sintonia, o sistema usado para comparações ficou conforme a Figura 10.

Figura 10 – Estrutura de controle para comparação



Fonte: Acervo do autor

A rotina de testes realizados para avaliação consiste em um tempo de estabilização (Valor Alvo = 0 mmHg) de 5 segundos, sucedido por quatro intervalos de 50 segundos, sendo cada um com um Valor Alvo, 50, 100, 150 e 50 mmHg

respectivamente. Entre os três primeiros intervalos existe um tempo de acondicionamento e reestabilização que dura 25 segundos. Após o teste com Valor Alvo de 150 mmHg esse *setpoint* cai para 50 mmHg, sem o intervalo. Essa queda visa testar o comportamento do sistema durante o alívio.

A Tabela 6 detalha as etapas dos testes, que foram realizados da mesma forma, para os dois tipos de sistema (com Lógica Difusa-PID e apenas PID).

Tabela 6 – Etapas dos testes experimentais

ETAPA	DESCRIÇÃO	TEMPO	SETPOINT
1	Acomodação/Estabilização	5 s	0 mmHg
2	Teste 1 - Pressurização	50 s	50 mmHg
3	Reestabilização	25 s	0 mmHg
4	Teste 2 - Pressurização	50 s	100 mmHg
5	Reestabilização	25 s	0 mmHg
6	Teste 3 - Pressurização	50 s	150 mmHg
7	Teste 4 - Alívio	50 s	50 mmHg

Fonte: Acervo do autor

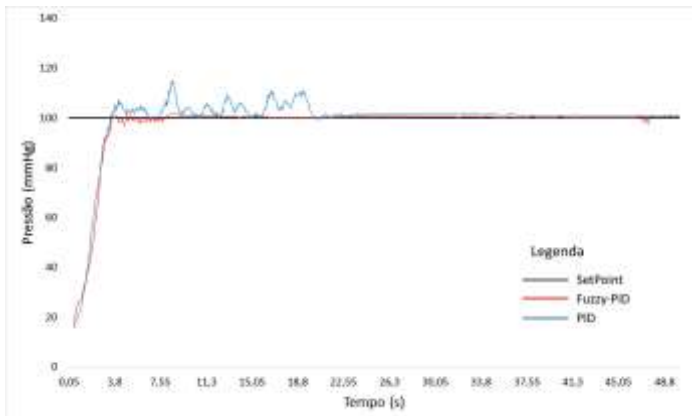
#### IV . RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação elaborada em LabVIEW, além de conter toda a parte lógica e fazer essa interface com a planta possibilitando seu funcionamento, têm a capacidade de registrar os dados do sistema durante esse funcionamento, com esses dados, é possível fazer as análises e comparações entre os métodos utilizados para o controle.

Como exemplo, a Figura 11 mostra o gráfico com as respostas dos dois métodos atuando na etapa 4, sob um Valor Alvo de 100 mmHg. É possível notar a resposta instável em ambos os métodos, mas que depois tende a se estabilizar (sem grandes perturbações). Já é perceptível que o método de controle utilizado para comparação (baseado apenas PID) apresenta uma taxa de erro maior em relação ao método abordado neste trabalho.

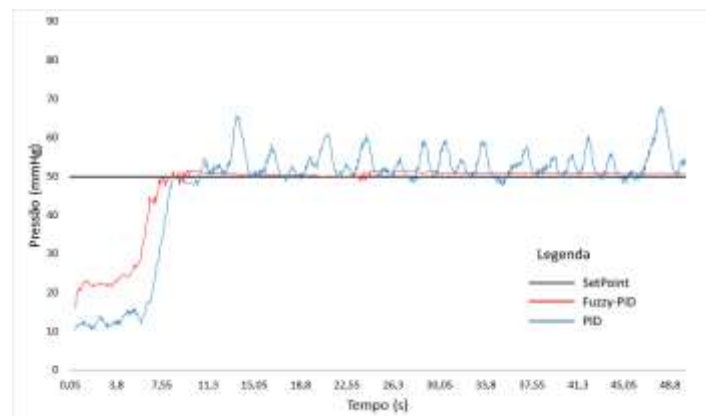
Com mais detalhes, a resposta do sistema com controle Fuzzy-PID, na mesma etapa (4, com *setpoint* de 100 mmHg) pode ser visto no gráfico da Figura 12. Os ganhos do PID se adaptam conforme o erro, de acordo com as funções da Lógica Difusa. É possível notar que a resposta apresenta uma certa instabilidade nos momentos após a pressão atingir o *setpoint*, mas depois se comporta de maneira mais estável ao longo do teste. As prováveis causas desse comportamento são ruídos, vazamentos, baixa tolerância ao erro, estabilidade da câmara devido ao material seus aspectos construtivos e resposta de alívio desproporcional. Essa instabilidade se mostra bastante atuante quando o sistema é controlado por PID convencional, devido aos ganhos do mesmo serem fixos, sem adaptabilidade ao erro, situações e condições adversas como as mencionadas acima, podem provocar um comportamento relativamente perturbado no sistema. Quando o mesmo foi controlado por Fuzzy-PID, essa perturbação tende a ser muito menor, pois a resposta do PID é, de certa forma, atenuada pelo Fuzzy.

Figura 11 – Teste – Etapa 4 – 100 mmHg



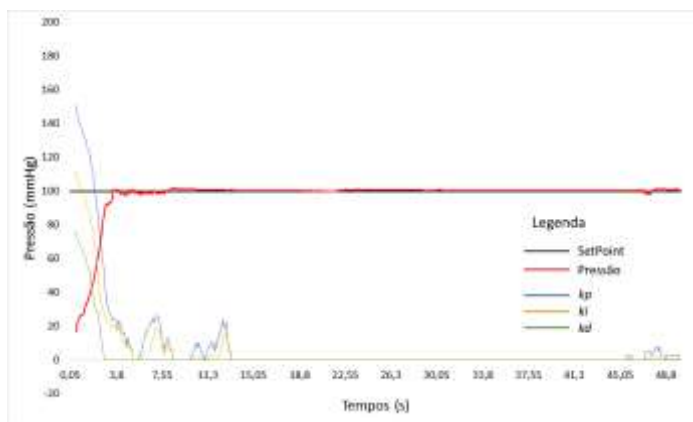
Fonte: Acervo do autor

Figura 13 – Teste – Etapa 2 – 50 mmHg



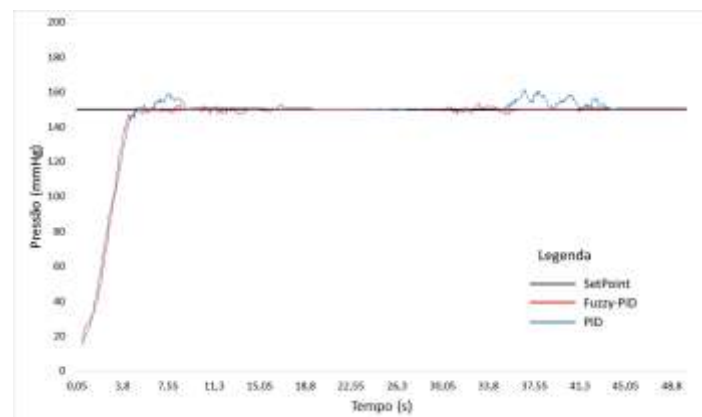
Fonte: Acervo do autor

Figura 12 – Resposta do Sistema Fuzzy-PID



Fonte: Acervo do autor

Figura 14 – Teste – Etapa 6 – 150 mmHg



Fonte: Acervo do autor

Outro ponto a ser analisado é o tempo em que o sistema atinge o Valor Alvo. Nesse parâmetro não foi notado uma diferença relevante entre os dois métodos, ou seja, a bomba de pressurização se comporta de maneira parecida sob ambos os tipos de controle.

O sistema controlado pelo método de PID convencional se mostrou bastante susceptível a perturbações durante boa parte dos testes. As Figuras 13, 14 e 15 mostram as respostas dos sistemas nas etapas 2, 6 e 7.

Na etapa 2, com *setpoint* baixo, 50 mmHG, o PID convencional praticamente não conseguiu manter o sistema estável durante o teste.

A etapa 6, que tem *setpoint* de 150 mmHg, foi a que os métodos fizeram com que o sistema apresentasse melhor resultado em termos de comparação. A resposta ao controle por PID convencional apresentou maior estabilidade em relação às etapas anteriores.

Uma hipótese para esse comportamento é que sendo os ganhos do controlador iguais em *setpoints* baixos e altos, mas, com o erro proporcionalmente maior nos baixos, a resposta para compensar tende a ser desproporcional e somado aos outros fatores que provocam instabilidades, fazem com que haja essa diferença de comportamento sob diferentes *setpoints*. Já o controle PID adaptado pela Lógica Difusa (Fuzzy-PID), se mostrou mais versátil às demandas do erro e *setpoint*.

A média quadrática dos erros em cada etapa confirma que o controle via PID convencional tende a promover um melhor comportamento com *setpoints* mais altos, menos neste experimentos e nestes testes. Já o controle com Lógica Difusa-PID se mostra mais estável sob os diferentes *setpoints*. Porém, como pode ser visto no gráfico da Figura 6, durante o teste em 150 mmHg ocorre uma perturbação aos 33,5s que gerou um aumento no índice de erro. Essa perturbação ocorreu nos dois testes, sem um motivo aparente. Mais testes são necessários para constatar se esse episódio pode ser considerado um comportamento ocasional.



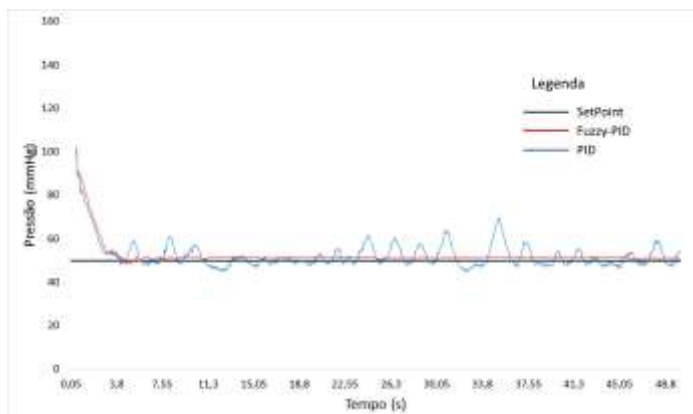
Tabela 7 – Erro Quadrático Médio (MSE)

ETAPA	SETPOINT	Fuzzy-PID	PID
2	50 mmHg	4,1978699	10,50399
4	100 mmHg	4,0394095	5,811419
6	150 mmHg	7,8557525	8,555429
7	50 mmHg	2,9687744	7,816806
TOTAL (MSE)		4,7654516	8,171912

Fonte: Acervo do autor

A Tabela 7 mostra os valores do erro quadrático médio de cada etapa. As etapas de estabilização não são consideradas.

Figura 15 – Teste – Etapa 7 – 50 mmHg



Fonte: Acervo do autor

A etapa 7, última, que visa analisar o sistema durante um alívio (brusca transição entre *setpoint* de 150 mmHg para 50 mmHg), mostrou, de certa forma, o mesmo comportamento das etapas anteriores, com o Fuzzy-PID se adaptando melhor às condições e o PID convencional com maior susceptibilidade à instabilidades. Conforme informado acima, a análise do erro no teste, em geral, mostra que o Fuzzy-PID promove um controle com erro 71% mais baixo do que o erro do sistema controlado apenas por PID.

Além dos valores analisados acima, os testes forneceram outras informações sobre o funcionamento do sistema e seus componentes. Entre essas informações, cabe destacar as que tratam do comportamento dos dispositivos utilizados no controle (bomba de pressão e válvulas de alívio).

Esses dados mostram que sistema controlado por Fuzzy-PID requer que a bomba funcione em 9% do que seria seu funcionamento total (potência total durante todo o teste). Já no PID convencional esse índice chega a 18%. Praticamente o dobro.

Quanto aos acionamentos das válvulas, os dados coletados mostram que o sistema controlado por Fuzzy-PID solicitou o acionamento das válvulas para alívio 86 vezes, contra 417 vezes sob o PID convencional.

Tabela 8 – Informações gerais do teste

Parâmetros	Fuzzy-PID	PID
Erro Quadrático Médio	4,76	8,17
Acionamento da Bomba*	9%	18%
Acionamento das Válvulas**	86	417

\* % de toda a capacidade durante o teste

\*\* quantidade de acionamentos

Fonte: Acervo do autor

Essas diferenças nas solicitações desses dispositivos são reflexos do comportamento do sistema. Um sistema instável requer uma maior ação da bomba e das válvulas, resultando não só em um índice de erro alto, mas também em maior desgaste dos componentes e gasto de energia.

#### IV . CONCLUSÃO

Este trabalho tinha como objetivo o desenvolvimento de um sistema de controle de pressão de ar de uma câmara de teste através do emprego de Lógica Difusa (Lógica Fuzzy) e os resultados foram positivos. A Lógica Difusa foi aplicada para o controle das válvulas que tinham a função de realizar o alívio da pressão e também, de forma mais relevante, na sintonia de um controlador PID, que realizava o acionamento da bomba de pressurização.

Os testes realizados expuseram as dificuldades e as limitações que os componentes determinavam sobre o sistema, como o fato das válvulas serem simples (não proporcionais), o que impedia o controle do fluxo de ar no alívio e que nos momentos de baixa sobrepressão provocavam um comportamento instável e que somado aos ruídos e instabilidades características do sistema como um todo (em relação à pressão), como as provocadas por pequenos vazamentos ou movimentos das mangueiras e câmara durante o funcionamento, geravam uma perturbação considerável.

Contudo, durante esses momentos desfavoráveis, foi possível observar como o mesmo sistema, mas controlado por PID convencional (pré-sintonizado), era consideravelmente mais instável na resposta. O Fuzzy-PID (PID com ganhos sintonizados por Lógica Difusa) mostrou desempenho superior, pois a sintonia se adaptava às condições e com isso a resposta era mais efetiva, resultando em um erro de regime menor e menos solicitação dos componentes (bomba e válvulas).

Quanto ao tempo necessário para que a pressão alcançasse o Valor Alvo (*setpoint*), não foi observado diferença significativa, ou seja, o controle desenvolvido não provocou um melhor desempenho nesse aspecto.

Outra observação é que os testes apresentaram pequenas oscilações mesmo após a estabilização. As prováveis causas são os ruídos e as instabilidades dos componentes e uma forma de minimizar o impacto desses eventos (ou até mesmo descobrir se são inerentes ao sistema) é realizar mais testes e estudar os comportamentos, aplicando recursos estatísticos como média, variância e desvio padrão.

- Anexo 1 – Diagrama PCB  
 Anexo 2 – Lista de Peças  
 Anexo 3 – Diagrama LabVIEW

É importante salientar que a Lógica Difusa possui um desenvolvimento arbitrário, ou seja, tecnicamente, não existem métodos sistemáticos que determinem o número de regras, seus formatos e como as funções de pertinência devem ser (Zheng et al, 2009), tornando esse processo bastante submetido aos conhecimentos técnicos, conhecimentos tácitos, intuitivos, e às observações do sistema por parte do desenvolvedor.

Além disso, se tratando do PID convencional, existem diversos métodos para a realização da sintonia, ou seja, a probabilidade da sintonia utilizada neste trabalho não ter sido a melhor para esse sistema é relativamente alta. Controladores PID são os mais utilizados nas aplicações industriais e sua importância na Engenharia de Controle é amplamente reconhecida.

Sendo assim, a comparação realizada neste trabalho não tem a pretensão de qualificar ou desqualificar qualquer método de controle e sim avaliar a maneira como uma aplicação de controle Fuzzy-PID responde ao comportamento de uma planta específica, e o mesmo se mostrou eficiente.

#### REFERÊNCIAS

- Atmel, 8-bit AVR Microcontrollers: ATmega328/P: Datasheet Complete, Nov. 2016. Disponível em: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P\\_Datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf)  
 Acesso em: 24 de nov. de 2017.
- Freescale Semiconductor, MPX5050: Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated, Revisão 3, Mar. 2010. Disponível em: <http://farnell.com/datasheets/673750.pdf>  
 Acesso em: 24 de nov. de 2017.
- LAH, Mateja Trobec; ZUPANCIC, Borut; KRAINER, Ales. Fuzzy control for the illumination and temperature comfort in a test chamber. Building and Environment, N° 40, Dez. 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132304003300> Acesso em: 24 de nov. de 2017.
- NISE, Norman S. Engenharia de Sistemas de Controle. 6. ed. São Paulo: LTC, 2012.
- OGATA, K., Engenharia de Controle Moderno, 5° ed. São Paulo: Ed. Pearson, 2010.
- ZHENG, Jian-ming; ZHAO, Sheng-dun; WEI, Shu-guo. Application of self-tuning fuzzy PID controller for a SRM direct drive volume control hydraulic press. Control Engineering Practice, N° 17, Dez. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066109001336> Acesso em: 14 de maio de 2018.