

PROJETO E CONTROLE DO PROTÓTIPO TÚNEL DE VENTO VERTICAL

LINSLEY DA COSTA OLIVEIRA DIAS, LUCAS DE SOUZA CORREA, REJANE DE BARROS ARAÚJO*

**Faculdade de Engenharia de Controle e Automação, Instituto Federal do Pará, PA*

Email: linsley.ifpa@gmail.com, lucorreassouza@gmail.com, rejane.barros@ifpa.edu.br

Abstract— In the training of astronauts, one of the basic capabilities for survival in space, consists in the adaptation in a place with gravity "0", and one of the ways to perform this preparation, is in a vertical tunnel with a high power fan at its base. In control engineering, there is the concern into practice the students in contact with the problems encountered in daily life, in industry and in the job market, in this case, building a prototype of a vertical wind tunnel to control the position of a free specimen, simulating an astronaut in training. The quantitative research prioritizes the numerical pointing of the frequency and intensity of the system's behavior, using mathematical and computational tools, reliably extracts the numerical results from the archetype. The qualitative research relates to the results, in understanding certain behaviors, therefore, it will be possible to analyze and understand the data obtained. A floor plan was developed for the application of control techniques, difficulties were observed in the construction of a real plan and the implementation of control strategies. The controller became conservative, therefore being more sensitive to variations in test body position, improving robustness and performance, achieving the goal.

Keywords— Vertical wind tunnel; Least squares recursive; Process control; PID controller; IMC Controller.

Resumo— No treinamento de astronautas, uma das capacitações básicas para a sobrevivência no espaço, consiste na adaptação em um local com gravidade "0", e uma das formas de realizar essa preparação, é em um túnel vertical com um ventilador de alta potência na sua base. Na engenharia de controle, existe a preocupação em colocar os alunos em contato com as problemáticas encontradas no dia-a-dia, na indústria e mercado de trabalho, neste caso, construindo um protótipo de túnel de vento vertical a fim de controlar a posição de um corpo de prova livre, simulando um astronauta em treino. A pesquisa quantitativa prioriza o apontamento numérico da frequência e intensidade do comportamento do sistema, utilizando de ferramentas matemáticas e computacionais, extrai com confiabilidade os resultados numéricos do arquétipo. A pesquisa qualitativa relaciona-se com os resultados, em compreender determinados comportamentos, logo, será factível analisar e entender os dados obtidos. Desenvolveu-se uma planta para aplicação de técnicas de controle, observou-se dificuldades na construção de uma planta real e a implementação de estratégias de controle. O controlador ficou conservativo, sendo assim mais sensível as variações de posição do corpo de prova, melhorando a robustez e desempenho, alcançando o objetivo.

Palavras-chave— Túnel de vento vertical; Mínimos quadrados recursivo; Controle de processos; Controlador PID; Controlador IMC.

1 Introdução

Nesse estudo do campo aeroespacial, foram desenvolvidos simuladores para elucidar o comportamento do astronauta em um local sem gravidade, o método utilizado assemelha-se a tecnologia da agência espacial americana, um cilindro de cinco metros de diâmetro e mais de dez metros de altura, e dentro dele as pessoas podem flutuar (VINHOLES, 2016). Em aplicações acadêmicas, que apesar de não adotarem a estrutura vertical, utilizam do controle de velocidade do vento para o fim a que se destinam, como a calibração de anemômetros de conchas (CUSTODIO, 2010) ou um túnel de vento subsônico do tipo soprador (COUTINHO, 2014).

O desenvolvimento prático do estudo da engenharia de controle vem sendo exigida cada vez mais ao longo dos anos, diversas áreas na ciência buscam pelo monitoramento, sensoriamento, atuação e controle de diversos processos, sendo eles físicos, químicos, econômicos, biológicos, dentre outros. Portanto, uma planta em escala reduzida e com relativo baixo custo, proporcionam um conjunto de conhecimentos no qual somam na formação de um estudante da área de controle de processos.

Um estudo aprofundado sobre o tema, a pesquisa quantitativa e qualitativa, as técnicas de instrumentação durante a construção do protótipo e aplicação do estudo na engenharia de controle serão capazes de tornar o projeto realizável, colocando a teoria em prática.

No capítulo 1, encontra-se toda a contextualização do tema abordado. Nos capítulos 2 e 3, estão os estudos necessários para formular as estratégias de controle do protótipo. No capítulo 4, detalha a construção do túnel de vento vertical e suas particularidades. No capítulo 5, encontra-se os resultados obtidos nos ensaios por meio das técnicas de identificação e controle que foram aplicadas. E no capítulo 6, estão presentes as conclusões de todo o estudo realizado.

2 Identificação de sistemas

A identificação de um sistema dinâmico pode ser entendida como a obtenção de um modelo matemático para esse sistema a partir de medidas de suas entradas e saídas (IOANNOU, 1996). Sendo assim, busca-se um equacionamento matemático que represente os aspectos essenciais de um sistema, manipulando os sinais de entrada e saída no intuito de obter um modelo descrito por uma

função de transferência. E por meio desta, poderá ser feito um estudo simulado a fim compreender o sistema real. Segundo COELHO (2014), em uma tarefa de identificação, diferentes procedimentos para geração do sinal de entrada, medição de saída e armazenamento de dados são utilizados, entre os quais se podem citar: identificação de um processo pelo teste de resposta ao degrau, pelo teste da resposta em frequência, off-line e a on-line.

2.1 Estimador dos mínimos quadrados recursivos

É a forma recursiva do estimador de parâmetros Mínimos Quadrados (MQ), sendo este utilizado para a modelagem do arquétipo.

2.1.1 Mínimos Quadrados

Determina que os valores mais prováveis de quantidades não conhecidas são aqueles em que a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e os computados é mínima. Sendo $\hat{\theta}$ uma variável aleatória, as propriedades podem ser analisadas utilizando-se a equação a diferenças do processo, ou seja, a qual define a saída real e a perturbação (COELHO, 2004).

$$y(k) = \varphi^T(k) \theta + e(k) \quad (1)$$

Sendo θ um vetor de parâmetros de n elementos, constante, porém desconhecido; $\varphi^T(k)$ é um vetor de medidas; $y(k)$ é um vetor da saída estimada com k elementos; $e(k)$ um ruído branco.

Matricialmente, tem-se:

$$Y(k) = \phi \theta + Y \quad (2)$$

Com o valor mais provável de θ dado por:

$$\hat{\theta} = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T Y \quad (3)$$

Sendo $(\phi^T \phi)^{-1} \phi^T$ a matriz pseudo-inversa de ϕ .

2.1.2 Mínimos quadrados recursivos

Consiste na identificação do sistema a cada intervalo de amostragem, tornando possível a utilização deste em um processo em pleno funcionamento.

Permite a atualização de parâmetros recursivamente a cada novo ponto medido (iteração). Não sendo necessário calcular a matriz inversa a cada iteração (COELHO, 2004).

A forma recursiva do estimador dos mínimos quadrados se resume em três equações:

$$K(k) = \frac{P(k-1)\varphi(k)}{I + \varphi^T P(k-1)\varphi(k)} \quad (4)$$

$$\hat{\theta} = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1)] \quad (5)$$

$$P(k) = P(k-1) + K(k)\varphi^T(k)P(k-1) \quad (6)$$

Sendo: $K(k)$ a matriz de ganho; $\hat{\theta}(k)$ o vetor de estimativa; $P(k)$ a matriz de covariância; $k=t+1$.

3 Controlador PID e sintonia

A combinação das ações proporcional, integral e derivativa, para gerar um só sinal de controle, dá origem ao que se chama de controlador proporcional-integral-derivativo (PID). O objetivo é aproveitar as características particulares de cada uma destas ações a fim de se obter uma melhora significativa do comportamento transitório e em regime permanente do sistema controlado. O sinal de controle gerado pelo controlador PID é genericamente dado como:

$$u(t) = K_c \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (7)$$

Desta forma têm-se três parâmetros de sintonia no controlador: o ganho K_c proporcional, o tempo integral T_i e o tempo derivativo T_d , e segundo (OGATA, 2011), esta ação combinada possui as vantagens de cada uma das três ações de controle individuais. Apesar de se ter a disponibilidade das três ações básicas, dependendo da aplicação, não é necessário a utilização de uma ou mais destas ações.

3.1 Ação Proporcional

Neste tipo de ação, o sinal de controle aplicado, a cada instante à planta, é proporcional à amplitude do valor do sinal de erro:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (8)$$

Assim, se em um dado instante, o valor da saída do processo é menor que o valor da referência ($e(t) > 0$), o controle a ser aplicado é positivo e proporcional ao módulo de $e(t)$. E se o valor da saída do processo é maior que o valor da referência ($e(t) < 0$), o controle a ser aplicado é negativo e proporcional ao módulo de $e(t)$. O controlador proporcional é essencialmente um amplificador com ganho ajustável (OGATA, 2011).

3.2 Ação Integral

A ação de controle integral consiste em aplicar um sinal de controle $u(t)$ proporcional à integral do sinal $e(t)$:

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \quad (9)$$

Sendo: T_i chamado de tempo integral ou reset-time, pois segundo OGATA (2011), a ação de controle integral é muitas vezes denominada de controle de restabelecimento.

A ação integral tem assim uma função "armazenadora de energia". Se a partir de um determinado tempo, t , o erro é igual a zero, $e(t) = 0$, o sinal de controle, $u(t)$, é mantido em um valor constante, proporcional a "energia armazenada" até o instante t . Este fato permite, no sistema em malha fechada, obter-se o seguimento de referência com erro nulo em regime permanente, pois a ação integral garante a aplicação ao processo de um sinal de controle constante de forma que $r(t) = y(t)$, sendo $r(t)$ o sinal de referência e $y(t)$ o sinal de saída do sistema em malha fechada. A função de transferência da ação integral é dada por:

$$G_c(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = \frac{1}{sT_i} \quad (10)$$

Assim sendo, sob um ponto de vista matemático, a ação integral permite aumentar o tipo do sistema, ou seja, a nova função de transferência em malha aberta será dada por $G_c(s)G(s)$, e possui um polo a mais na origem, fato este que permite obter-se erro nulo em regime permanente à determinadas referências do tipo degrau.

A ação integral estar diretamente ligada à melhoria da precisão do sistema. Entretanto, a introdução de um polo na origem na função de transferência em malha aberta, tende a piorar a estabilidade relativa do sistema em malha fechada ou mesmo torná-lo instável. Por este motivo, esta ação de controle em geral não é aplicada de maneira isolada, geralmente ela é combinada com a ação proporcional.

3.3 Ação derivativa

Esta ação corresponde a aplicação de um sinal de controle proporcional a derivada do sinal de erro:

$$u(t) = T_d \frac{d e(t)}{dt} \quad (11)$$

A função de transferência desta ação é dada por:

$$G_c(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = T_d s \quad (12)$$

Este tipo de função de transferência implica em um ganho que cresce com o aumento da frequência, fato este que deixaria o sistema extremamente sensível a ruídos de alta frequência, pois enquanto a ação de controle derivativa possui a vantagem antecipatória, apresenta as desvantagens de amplificar sinais de ruído e causar um efeito de saturação no atuador (OGATA, 2011). A

implementação analógica de um derivador puro é fisicamente impossível. Por estes motivos, a ação derivativa é implementada com a introdução de um polo em alta frequência que tem justamente a finalidade de limitar o ganho em alta frequência. A função de transferência torna-se então:

$$G_c(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = T_d \frac{sp}{s + p} \quad (13)$$

A derivada de uma função está relacionada intuitivamente com a tendência de variação desta função em um determinado instante de tempo. Assim, aplicar como controle um sinal proporcional à derivada do sinal de erro é equivalente a aplicar uma ação baseada na tendência de evolução do erro. A ação derivativa é então dita antecipatória ou preditiva, e tende a fazer com que o sistema reaja mais rapidamente. Este fato faz com que a ação derivativa seja utilizada para a obtenção de respostas transitórias mais rápidas, ou seja, para melhorar o comportamento dinâmico do sistema em malha fechada. No caso em que, em regime permanente, o sinal de erro é constante, a ação derivativa será igual a zero, ou seja, esta ação atua apenas durante a resposta transitória.

3.4 Método de sintonia

Existem na literatura diversos métodos de sintonia para o controlador PID, desde técnicas clássicas até as técnicas avançadas, porém, neste trabalho será abordada a que se adequou melhor ao sistema proposto.

3.4.1 Controlador por modelo Interno

Em 1982, C. E. Garcia e M. Morari desenvolveram e propuseram uma nova maneira de projetar sistemas de controle, denominado projeto do Controlador por Modelo Interno (IMC - Internal Model Control). Segundo eles, o novo modelo foi desenvolvido segundo o princípio do modelo interno para combinar o modelo do processo e a dinâmica do sinal externo (GARCIA, 1982).

No controlador IMC, a síntese da lei de controle está baseada em um modelo estimado e relaciona os ganhos do controlador aos parâmetros do modelo do processo.

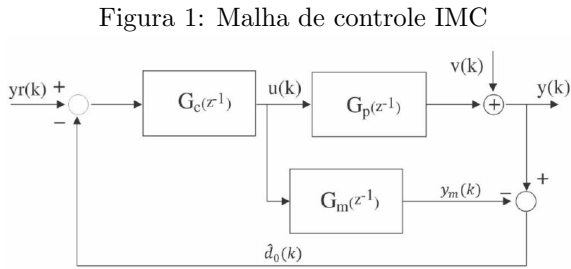
As principais características do projeto IMC é a estrutura simples da lei de controle, com apenas um parâmetro para sintonia off-line ou on-line deste controlador. A facilidade de interpretação da sintonia dele pode-se associar a dinâmica da planta de malha fechada com a resposta de um sistema de 1ª ordem, e a constante de tempo é determinante na qualidade da estabilidade de malha fechada.

Essa técnica melhora a robustez e desempenho do controle em sistemas com longo atraso de

transporte, no tratamento de incertezas no modelo e rejeição de perturbações. Aplicações efetivas do IMC em processos industriais são áreas de interesse das comunidades acadêmica e industrial. Pode-se perceber que o controlador IMC é uma melhor estrutura para implementar sistemas de controle robusto pois nesta estratégia o controlador surge linearmente nas funções de sensibilidade (ISSA, 2011).

A estrutura do controlador IMC tem sido combinada com outras técnicas, tais como lógica fuzzy, adaptativas, preditivas e redes neurais, também sendo hibridizada com o controlador PID (KNIHS et al., 2010). A hibridização do controle IMC com o controlador PID é adotada devido as seguintes vantagens: considera as incertezas na planta e/ou modelo, ajusta o desempenho dinâmico do sistema de controle frente a robustez para mudanças no processo e erros de modelagem, e contorna o efeito das perturbações que aparecem diretamente na saída da planta, sendo estas vantagens interessantes na implementação do sistema de controle com o processo túnel de vento.

Considere o diagrama de blocos de uma malha de controle IMC (figura 1), representado por um processo, $G_p(z^{-1})$, modelo, $G_m(z^{-1})$, e controlador, $G_c(z^{-1})$, linear discreto e com perturbação atuando na saída.



Fonte: KNIHS et al. (2010)

$$\bar{N} = G_c(z^{-1})G_p(z^{-1}) \quad (14)$$

$$\bar{N} = [1 - G_c(z^{-1})G_m(z^{-1})] \quad (15)$$

$$\bar{D} = 1 + G_c(z^{-1})[G_p(z^{-1}) - G_m(z^{-1})] \quad (16)$$

$$y(k) = \frac{\bar{N}}{\bar{D}}y_r(k) + \frac{\bar{N}}{\bar{D}}v(k) \quad (17)$$

No diagrama IMC, $v(k)$ é uma perturbação desconhecida afetando a dinâmica de malha do sistema. A variável manipulada, $u(k)$, é aplicada no processo e modelo. A saída do processo, $y(k)$, é comparada com a saída do modelo, $y_m(k)$, resultando no sinal $\hat{d}_0(k)$, calculado por $\hat{d}_0 = [G_p(z^{-1}) - G_m(z^{-1})]u(k) + v(k)$.

Então pode-se considerar que:

- Se $G_p(z^{-1}) = G_m(z^{-1})$, então $\hat{d}_0(k)$ é igual a perturbação desconhecida.

- Se $v(k)$ é zero, então $\hat{d}_0(k)$ é a medida da diferença do comportamento entre o processo e o modelo. Assim, $\hat{d}_0(k)$ pode ser considerado como a informação que é perdida e pode ser utilizada para melhorar o desempenho de malha fechada.
- Se $G_p(z^{-1}) \neq G_m(z^{-1})$, a rejeição da perturbação pode ainda ser garantida desde que a relação $G_c(z^{-1}) = G_m(z^{-1})$ seja assegurada.
- Se $G_c(z^{-1}) = G_m(z^{-1})$ e $G_p(z^{-1}) = G_m(z^{-1})$, então o rastreamento da referência, de ganho unitário, e rejeição da perturbação, de ganho nulo, é obtido.

Considerando um sistema de controle com um modelo perfeito, $G_p(z^{-1}) = G_m(z^{-1})$, então:

$$y(k) = \bar{N}y_r(k) + \bar{N}v(k) \quad (18)$$

Portanto, para garantir erro de regime permanente nulo, $y(k) = y_r(k)$ e $\frac{y(k)}{v(k)} = 0$, o controlador IMC perfeito é simplesmente a inversa do modelo do processo, $G_c(z^{-1}) = \frac{1}{G_m(z^{-1})}$.

Como na prática não se tem um modelo preciso, o controlador ideal não é obtido. Adicionalmente, o controlador ideal não é fisicamente realizável, pois é não causal e não pode ser aplicado a processos de fase não mínima.

Fatorando o modelo do processo, como $G_m(z^{-1}) = G_m^+(z^{-1})G_m^-(z^{-1})$, onde $G_m^+(z^{-1})$ contém o termo do atraso de transporte discreto, z^{-d} , os zeros fora do círculo unitário e os zeros na vizinhança do ponto (1,0) do círculo unitário, e a parcela $G_m^-(z^{-1})$ deve ter ganho unitário de regime permanente.

O controlador é obtido pela inversão de $G_m^-(z^{-1})$ e multiplicado por um filtro, $F(z^{-1})$, para melhorar a robustez do sistema, reduzir a atividade da ação do sinal de controle, bem como garantir a realização física de $G_c(z^{-1})$. A função de transferência do controlador é calculada por:

$$G_c(z^{-1}) = \frac{u(k)}{e(k)} = \frac{F(z^{-1})}{G_m^-(z^{-1})} \quad (19)$$

Onde $e(k) = y(k) - v(k)$

$F(z^{-1})$ é um filtro digital obtido de um filtro passa-baixa contínuo $F(s)$, ou seja, $F(s) = \frac{1}{(\tau_{MF}s + 1)^m}$, sendo τ_{MF} a constante de tempo de malha fechada desejada especificada pelo projetista e "m" é o menor inteiro positivo de modo a garantir uma função própria para $G_c(z^{-1})$. Se $m = 1$, então o filtro de 1ª ordem discreto equivalente é dado por:

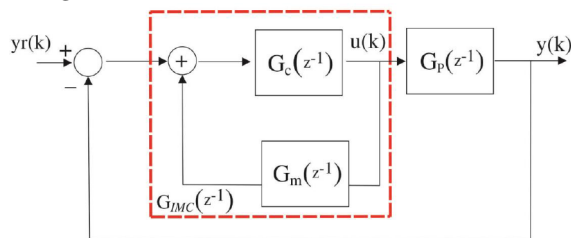
$$F(z^{-1}) = \frac{(1 - \alpha)z^{-1}}{1 - \alpha z^{-1}} \quad (20)$$

Sendo então, $\alpha = e^{-T_s/\tau_{MF}}$, $0 < \alpha < 1$.

A seleção do parâmetro τ_{MF} tem importante função no projeto IMC, pois este parâmetro aumentado resulta em um controlador conservativo devido ao polo discreto assumir valor $\alpha \approx 1$, enquanto que para $\alpha \approx 0$, obtém-se uma dinâmica agressiva

Existem muitos métodos disponíveis para determinar valores aceitáveis dos ganhos do PID. O processo de determinação dos ganhos é frequentemente chamado de sintonia PID (DORF, 2013), o procedimento de projeto do IMC, se aplicado a modelos de ordem reduzida, pode ser empregado na sintonia de controladores PI e PID. Considerando a estrutura IMC modificada (Figura 02) e desconsiderando a perturbação tem-se:

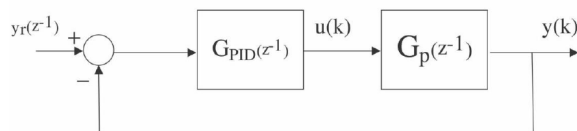
Figura 2: Malha de controle IMC modificada



Fonte: KNIHS et al. (2010)

É equivalente a malha de controle clássica com o controlador PID:

Figura 3: Malha de controle clássica PID



Fonte: KNIHS et al. (2010)

Comparando-se as figuras 02 e 03, obtém-se a relação:

$$G_{PID}(z^{-1}) = G_{IMC}(z^{-1}) \quad (21)$$

$$G_{IMC}(z^{-1}) = \frac{G_c(z^{-1})}{1 - G_c(z^{-1})G_m(z^{-1})} \quad (22)$$

Fazendo as devidas manipulações matemáticas, tem-se:

$$\tilde{D} = [1 - G_m^+(z^{-1})F(z^{-1})] \quad (23)$$

$$G_{PID}(z^{-1}) = \frac{F(z^{-1})}{G_m^-(sz^{-1})\tilde{D}} \quad (24)$$

Assumindo um modelo de sintonia de 2ª ordem para a planta controlada do tipo:

$$G_m(z) = \frac{z^{-(d+1)}(b_0 + b_1z^{-1})}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}} \quad (25)$$

E adotando-se um filtro de 1ª ordem da forma:

$$F(z) = \frac{b_f z^{-1}}{1 - a_f z^{-1}} = \frac{(1 - \alpha)z^{-1}}{1 - \alpha z^{-1}} \quad (26)$$

Sendo $a_f = \alpha$, $b_f = (1 - \alpha)$ e τ_{MF} uma constante selecionada pelo projetista, que regula a velocidade de resposta do sistema de malha fechada. De acordo com o projeto do controlador IMC, a síntese do PID discreto é realizada por:

$$G_{PID} = \frac{b_f}{(b_0 + b_1)} \frac{(1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2})}{(1 - a_fz^{-1} - b_fz^{-d-1})} \quad (27)$$

A seguinte lei de controle é usada para o IMC na sintonia do PID discreto que é implementada:

$$G_c(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0 + q_1z^{-1} + q_2z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (28)$$

Sendo: $q_0 = K_c + K_d$, $q_1 = -K_c + K_i - 2K_d$, $q_2 = K_d$

É então possível reescrever a equação do controlador PID como:

$$\tilde{b} = \frac{b_f}{(b_0 + b_1)} \quad (29)$$

$$G_{PID}(z) = \tilde{b} \frac{(1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2})}{[1 + d(1 - a_f)](1 - z^{-1})} \quad (30)$$

Fazendo,

$$\bar{K} = \frac{b_f}{(b_0 + b_1)[1 + d(1 - a_f)]} \quad (31)$$

Tem-se:

$$G_{PID}(z) = \bar{K} \frac{(1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2})}{(1 - z^{-1})} \quad (32)$$

Logo:

$$\bar{K} = q_0 = K_c + K_d \quad (33)$$

$$\bar{K}a_1 = q_1 = -K_c + K_i - 2K_d \quad (34)$$

$$\bar{K}a_2 = q_2 = K_d \quad (35)$$

Portanto, as equações para sintonia do controlador PID discreto assumem a forma:

$$K_c = \bar{K}(1 - a_a) \quad (36)$$

$$K_i = \bar{K}(1 + a_1 + a_2) \quad (37)$$

$$K_d = \bar{K}a_2 \quad (38)$$

4 Túnel de vento vertical

4.1 Construção do Protótipo

Para confecção do protótipo são utilizados materiais de baixo custo de forma a facilitar a replicação do projeto. Na Tabela 1 é possível observar os materiais usados:

Tabela 1: Materiais para a construção do túnel de vento

Material	Quantidade
Base metálica 40x20 cm	01
Tubo em pvc 100 mm	01
Curva em pvc 100 mm	01
Tampa em pvc 100 mm	01
Tubo em acrílico 100 mm	01
Abraçadeira rosca	02
Bola em isopor 75 mm	01
Motor CC com hélice	01
Luva simples em pvc 100 mm	01

Fonte: O autor

O túnel de vento tem o formato em "L", fixado a base metálica com as abraçadeiras rosca. O ventilador é adaptado a tampa em pvc de forma a encaixar-se em uma das extremidades do tubo, na outra extremidade é fixa a curva e em seguida o tubo em acrílico, dando assim o formato em "L" proposto. Para uma leitura mais didática, o tubo graduado possui 30 cm de altura e é mapeado de 0-5 V, sendo 0 V correspondente a altura mais baixa e 5 V correspondente a maior altura, como mostrado na figura 4:

Figura 4: Túnel de vento graduado

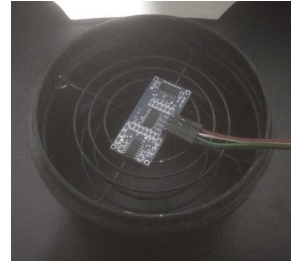


Fonte: O autor

Com o túnel de vento montado, é então acoplada a ele uma luva de pvc na qual é afixado o sensor ultrassônico. Ela é confeccionada de forma a possibilitar a passagem de vento do túnel e limitar o corpo de prova a uma posição máxima de 5 cm do sensor, considerando que a leitura do HC-SR04 possui sensibilidade a partir de 4 cm e

qualquer valor inferior a esse tornaria a medição insatisfatória.

Figura 5: Tampa com o sensor ultrassônico



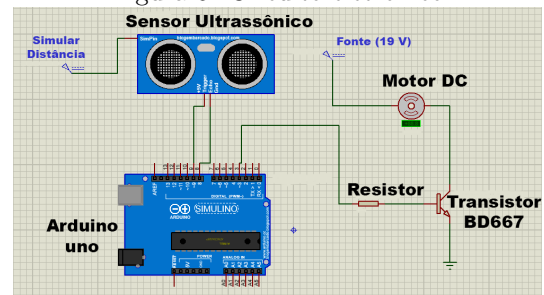
Fonte: O autor

Dentro do túnel de vento é colocada uma bola de isopor, assim como um limitador que impede esta de cair além do tubo em acrílico. Finalmente o tubo em acrílico que corresponde a parte a ser visualizada do túnel de vento é marcado de forma graduada a cada 5 cm, permitindo assim a leitura visual de posição do corpo de prova.

4.2 Circuito eletrônico

O projeto eletrônico é dividido em duas partes: circuito de medição, no qual realiza a leitura dos sinais por meio de um sensor ultrassônico e o circuito de atuação, responsável pelo acionamento do motor. No projeto do circuito eletrônico é utilizado um software especializado para simular o funcionamento dos circuito real, evitando possíveis falhas e queimas de componentes, conforme a figura 6:

Figura 6: Circuito eletrônico



Fonte: O autor

O acionamento é realizado pelo arduino por meio da porta PWM, a placa emite um pulso com largura dependente do sinal de controle enviado pelo algoritmo construído, que por sua vez leva em consideração a posição lida pelo sensor ultrassônico que está conectado na porta analógica. A velocidade de giro do motor CC, e consequentemente, a potência do vento, determina o movimento do corpo de prova no túnel.

Por meio do sensor é feita a medição da posição do objeto, os valores obtidos em centímetros são armazenados em um vetor com o limite de 20 medidas, e a média destes valores é calculada afim

de obter uma única medida que represente melhor a real posição do corpo, eles então são sobrescritos, e a operação se repete enquanto durar o teste, visando reduzir os ruídos na medição que são característicos do sensor.

Os materiais eletrônicos utilizados para acionamento e medição da planta estão listados na Tabela 2:

Tabela 2: Materiais utilizados para acionamento e medição da planta

Material	Quantidade
Arduino UNO	01
Sensor ultrassônico HC-SR04	01
Transistor BD677 darlington	01
Resistor 10 Ω	01
Jumper	10
Fonte regulável 12-24 V	01
Dissipador de calor	01
Borne Fêmea 3P	01
Borne Fêmea 2P	01
Placa de fenolite 7 x 6 cm	01

Fonte: O autor

5 Resultados

5.1 Identificação do Protótipo

No processo, observou-se a sua característica é instável quando submetido a uma entrada degrau em malha aberta. Devido a isso, torna-se impossível a estimação de seus parâmetros de forma off-line. A forma encontrada para estimação dos parâmetros, foi utilizar o algoritmo dos MQR on-line, ou seja, identificar os parâmetros periodicamente, dependendo do período de amostragem escolhido, juntamente com o controlador, isto é, em malha fechada. A identificação feita pelo algoritmo MQR de forma on-line associa a leitura do sinal enviado pelo sensor ultrassônico por meio do arduino, sinal de saída do sistema de controle, e a entrada aplicada no motor, sinal de controle.

5.2 Estratégia de controle

Além a aplicação do controle por modelo interno (IMC), utiliza-se os índices de desempenho sugeridos pela literatura, para quantificar a qualidade do projeto dos controladores, em termos de rastreamento de referência e energia do sinal de controle. Os índices são: integral do erro quadrático (ISE), integral de valor absoluto do erro (IAE) e a variação total de controle (TVC), calculados pelas equações a seguir.

$$ISE = \sum e(k)^2 \quad (39)$$

$$IAE = \sum |e(k)| \quad (40)$$

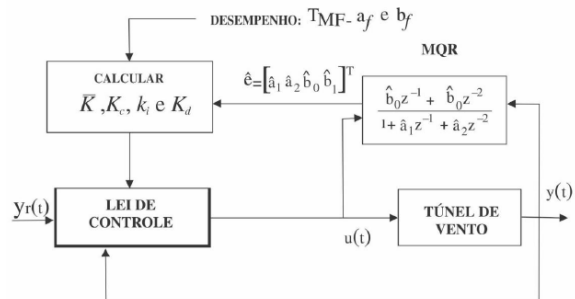
$$TVC = \sum |\Delta u(k)| \quad (41)$$

Onde $e(k)$ é o erro calculado entre a referência $y_r(k)$ e o sinal de saída $y(k)$, e $\Delta u(k)$ é o incremento de controle calculado pelo sinal de controle atual menos o sinal de controle anterior ($u(k) - u(k-1)$). Também é observado o comportamento da planta associada ao controlador para a entrada degrau de diferentes amplitudes.

5.3 PID adaptativo sintonizado via projeto IMC discreto

Para este projeto escolhe-se o valor de $\tau_{MF} = 1,65$, visando o melhor desempenho do controlador, assim como um período de amostragem de 0,1 s, com 900 iterações e três mudanças de referência. O controlador PID é implementado na configuração paralela e a partir daí calcula-se $\bar{K}$, K_c , K_i e K_d a cada iteração, aplicando-se então o sinal de controle ao sistema. Todo esse procedimento segue o diagrama de blocos da figura 7:

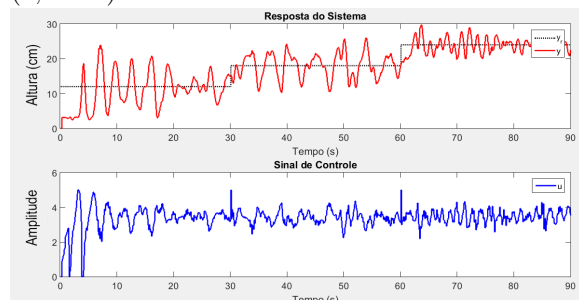
Figura 7: Diagrama de blocos PID-IMC adaptativo via projeto IMC discreto.



Fonte: O autor

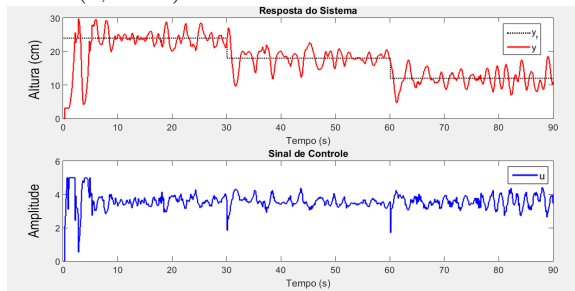
Nas figuras 8 e 9, observa-se o comportamento do corpo, assim como a amplitude do sinal de controle em resposta aos degraus aplicados com as devidas mudanças de referências.

Figura 8: Resposta do sistema a degrau crescente (2, 3 e 4)



Fonte: O autor

Figura 9: Resposta do sistema a degrau decrescente (4, 3 e 2)



Fonte: O autor

Na figura 8, por aspectos da planta e também da força gravitacional observa-se uma dificuldade maior no rastreamento, devido aos 3 degraus que demandam ação de subida, necessitando mais energia de controle. Enquanto na figura 9, ocorreu um melhor rastreamento de referência pelo comportamento mais conservativo do controlador, não havendo amplificação do ruído característico da planta, demandando menos energia de controle. Na tentativa de obter melhor desempenho utilizaram-se valores maiores para τ_{MF} , porém, apesar da redução do esforço de controle, o sistema tornou-se muito lento, levando a um funcionamento indesejado, pois não houve rastreamento de referência dado o caráter dinâmico da planta requerer uma resposta mais rápida.

Após a realização dos ensaios, os parâmetros do controlador obtidos são mostrados nas tabelas 3.

Tabela 3: Parâmetros finais do controlador para o degrau crescente e decrescente

Ganhos	PID-IMC cres	PID-IMC decres
Kc	0,4163	0,5793
Ki	0,0616	0,0661
Kd	1,9866	2,1285

Fonte: O autor

Os desempenho do controlador podem ser visualizado por meio das tabelas 4.

Tabela 4: Índices de desempenho para o degrau crescente e decrescente

Índices	PID-IMC cres	PID-IMC decres
ISE	329,53	410,28
IAE	463,21	365,48
TVC	173,78	189,72

Fonte: O autor

Devido a escolha do parâmetro α_f próximo de "1", tornou o controlador mais conservativo, sendo assim mais sensível as variações de posição do corpo de prova, melhorando a robustez e desempenho.

6 Conclusões

A projeto construído foi uma grande maneira de aplicar os conhecimentos de controle de processos, como também, de outras áreas tecnológicas. Propõe-se a substituição do sensor ultrassônico por um óptico, além disso, aplicar outras técnicas de controle e adicionar uma perturbação externa ao sistema, gerando novos desafios.

Agradecimentos

Agradecer aos familiares e amigos pelo companheirismo ao longo dessa etapa, e a Prof^a Dr^a Rejane Barros, por estar sempre incentivando, auxiliando e propondo desafios na engenharia de controle.

Referências

- COELHO, A. A. R; COELHO, L. S. (2004). *Identificação de sistemas dinâmicos lineares*, editora ufsc.
- COUTINHO, F. R. (2014). Projeto de um túnel de vento subsônico do tipo soprador.
- CUSTODIO, M. C. (2010). Automação do controle de velocidade do ar no túnel de vento da ufrgs.
- DORF, R. C; BISHOP, R. H. (2013). *Sistemas de Controle Modernos*, LTC.
- GARCIA, C. E; MORARI, M. (1982). Internal model control. a unifying review and some new results.
- IOANNOU, P. A; SUN, J. (1996). *Robust Adaptive Control*, Prentice-Hall.
- ISSA, W. R. (2011). *A new approach of robust internal model control for nonlinear pendulum system*, Masters dissertation, Islamic University of Gaza, Palestine.
- KNIHS, V; FRANCA, A; SILVEIRA, A; GOMES, F and COELHO, A. (2010). Aplicação da sintonia imc no controlador pid em sistemas não-lineares simulados com scicoslab, pp. 1 – 6.
- OGATA, K. (2011). *Engenharia de controle moderno*, Pearson.
- VINHOLES, T. (2016). *IFLY Inaugura Simulador de Paraquedismo em São Paulo*, Disponível em: <www.airway.uol.com.br/simulador-de-paraquedismo-ifyl-inaugura-unidade-em-sao-paulo/>. Acesso em: 05 Fev. 2019.